

CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

CONTRIBUTO DA UTILIZAÇÃO DA PAREDE TROMBE

Miguel António da Graça Gomes

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador científico: Prof. Doutor Miguel Pires Amado

Presidente: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques

Vogal: Prof. Doutor Daniel Aelenei

Vogal: Prof. Doutor Miguel Pires Amado

Maio de 2011

“CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL – CONTRIBUTO DA UTILIZAÇÃO DA PAREDE
TROMBE”

Copyright © 2011 de Miguel António da Graça Gomes, FCT/UNL, UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Miguel Pires Amado, orientador da presente dissertação, pelo apoio, incentivo e disponibilidade demonstrados desde o início. Agradeço a ajuda, saber e experiência partilhada que foram fundamentais para a realização deste trabalho e determinantes para o meu conhecimento profissional e pessoal.

Ao Arq. João Mariz da Graça do Laboratório Nacional Energia e Geologia, ao Professor Doutor Daniel Aelenei da Faculdade Ciências e Tecnologia e ao Eng. João Filipe Afonso pela disponibilidade de informação referente ao programa *EnergyPlus*. Ao Arq. Fausto Simões pela sua colaboração no fornecimento de informação relevante e essencial para a elaboração da presente dissertação. À Linda Lawrie do *U.S. Department of Energy- Energy Efficiency & Renewable Energy* pelo auxílio demonstrado em assuntos referentes ao programa *EnergyPlus*.

À Dr.^a Ana Paula Candeias, funcionária da Biblioteca do LNEG, ao Eng. Paulo Calau e Eng. Paulo Santos da ADENE pela informação disponibilizada sempre que solicitada.

Aos meus pais, irmã e namorada pela motivação e apoio constante que se tornaram estímulos fundamentais para a elaboração deste trabalho.

Aos meus familiares e amigos pela amizade e simpatia demonstradas durante esta importante etapa da vida.

Resumo

O aumento dos níveis de poluição ambiental e da temperatura média no planeta, bem como a elevada produção de resíduos resultantes das actividades humanas tornaram-se temas de destaque no momento presente para toda a sociedade.

A preocupação com o perigo de esgotamento dos recursos naturais coloca aos diversos sectores de actividade a necessidade de adopção de um processo que os enquadre nos princípios do desenvolvimento sustentável assim como, impõe a definição de medidas de implementação que contribuam para esse objectivo.

No sector da construção este é já um tema em destaque, uma vez que este sector é responsável por uma grande parcela de recursos naturais e pela origem de elevadas emissões poluentes. Por outro lado, a procura de um elevado conforto ambiental no interior dos edifícios tem tido como resultado o aumento do consumo energético no parque edificado. A solução mais imediata para a procura do nível de conforto tem sido o recurso à instalação de equipamentos mecânicos para a climatização dos edifícios. Deste modo, mostra-se necessário alterar práticas de concepção dos edifícios, introduzindo o recurso ao aproveitamento de fontes de energias renováveis, como o Sol. Através da introdução de soluções passivas como contributo para a redução de consumos energéticos nos edifícios, o sistema de parede Trombe apresenta-se com potencial de eficiência elevado.

Com vista a avaliar a efectiva contribuição da parede Trombe para a eficiência energética de edifícios e com recurso à utilização do programa *EnergyPlus*, um método de análise dinâmica, procedeu-se à simulação de uma célula teste em duas localidades de Portugal (Lisboa e Guimarães) tendo por base a análise do comportamento térmico da mesma com três soluções construtivas diferentes (parede Trombe, parede dupla com envidraçado, parede dupla) na parede com orientação Sul. A opção pela simulação em locais geográficos distintos pretende evidenciar o potencial da solução - parede Trombe.

Pelo estudo realizado fica evidente que a utilização do sistema de parede Trombe contribui para a melhoria do desempenho energético de edifícios, com a consequente poupança de energia e emissões de gases.

Palavras-chave: Desenvolvimento Sustentável, Construção Sustentável, Eficiência energética, Parede Trombe, Simulação, *EnergyPlus*.

Abstract

The increase of environmental pollution's levels and the rise of the planet's medium temperature, as well as the high waste production derived from human activities, have been highlight themes in the current society.

The concern about the danger of exhaustion of natural resources brings to the several activity sectors the need to define a process which adapts itself to the principles of sustainable development, as well as it demands to define the urgent implementation measures witch concurs to that goal.

In the building sector this is already a highlight theme, since it is responsible for a large portion of the natural resources and for the source of high pollutant emissions. On the other hand, the demand for high ambiental comfort in the buildings' interior has had as a result the increase of energy consumption in the building stock. The most immediate solution for the quest for the comfort level has been the installation of mechanic equipment to the buildings' acclimatization. Thus, it is necessary to reconsider practices for the buildings' conception, using renewable energy sources, as the Sun. By introducing passive solutions as a contribute to the energetic consumption's decrease in the buildings, the Trombe wall system presents itself with a high efficiency potencial.

In order to validate the effective contribution of the Trombe wall in buildings' energetic efficiency, and using the EnergyPlus software, a dynamic analysis method, a test cell simulation was conducted in two locations from Portugal (Lisboa and Guimarães), based on its thermal behavior analysis with three different constructive solutions (Trombe wall, glazed double brick wall, double brick wall) on its South orientated wall. The option for simulation in distinct geographic locations has the intention to point out the solution's potential – Trombe wall.

Through the execution of this study it is clear that the use of the Trombe wall system in buildings contributes to the improvement of energetic performance of buildings, resulting in energy saving and gases emissions.

Key-words: Sustainable Development, Sustainable Construction, Energetic Efficiency, Trombe Wall, Simulation, EnergyPlus.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Apresentação do tema.....	1
1.2	Objectivo	2
1.3	Estrutura do trabalho	2
2	Desenvolvimento Sustentável	5
2.1	Enquadramento.....	5
2.2	Construção Sustentável.....	8
2.2.1.	Energia	12
2.2.2.	Materiais.....	16
2.2.3.	Gestão da Água	17
2.2.4.	Qualidade do ar interior.....	19
2.2.5.	Desconstrução	20
2.3	Parede Trombe.....	23
2.4	Sistemas de Avaliação da Construção Sustentável.....	25
2.4.1	Principais Sistemas de Avaliação da Construção Sustentável	29
2.4.1.1	BREEAM	30
2.4.1.2	LEED.....	32
2.4.1.3	LiderA	35
3	Conservação de energia	39
3.1	Energia Solar e os edifícios	39
3.2	Geometria solar.....	40
3.2.1	Orientação das fachadas envidraçadas e protecção solar	43
3.3	Parâmetros térmicos associados aos edifícios	45
3.3.1	Fenómenos de transmissão de calor	45
3.3.2	Transmissão de calor por condução	46
3.3.3	Transmissão de calor por convecção.....	47
3.3.4	Transmissão de calor por radiação	49
3.3.5	Inércia térmica.....	51
3.3.6	Coeficiente transmissão térmica (U)	55

3.4	Soluções solares passivas e activas	56
3.4.1	Exemplos de soluções passivas aplicáveis em projecto	57
3.4.2	Sistemas de ganho directo	58
3.4.3	Sistemas de ganho indirecto	59
3.4.4	Sistemas de ganho isolado.....	60
3.5	Estratégias Bioclimáticas.....	61
3.5.1	O Homem e as suas necessidades higrotérmicas	61
3.5.2	Concepção de um edifício	64
3.5.3	Estratégias bioclimáticas segundo zonas climáticas definidas no RCCTE.....	67
3.5.3.1	Zona I1-V2	68
3.5.3.2	Zona I2 -V2	69
3.6	Síntese.....	70
4	Parede Trombe	73
4.1	Sistemas de Funcionamento e Sistemas Construtivos	73
4.1.1	Parede Trombe não ventilada (PTNV).....	73
4.1.2	Parede Trombe ventilada (PTV)	76
4.1.3	Vantagens e inconvenientes da parede Trombe	77
4.2	Pré-dimensionamento	78
4.3	Exemplos em Portugal.....	79
4.3.1	Condomínio Quinta Verde	79
4.3.2	Casa Solar Passiva de Vale Rosal	82
4.3.3	Casa Termicamente Optimizada	86
5	Análise de caso de estudo.....	89
5.1	O programa <i>Energy Plus</i>	89
5.2	Metodologia utilizada para definição do problema em estudo	90
5.2.1	Parede Trombe no <i>EnergyPlus</i>	90
5.2.2	Edifício	92
5.2.3	Parâmetros de simulação (<i>Simulation Parameters</i>)	93
5.2.4	Localização e Clima (<i>Location and Climate</i>)	94
5.2.5	Horários (<i>Schedules</i>)	95

5.2.6	Elementos de construção (<i>Surface Construction Elements</i>)	97
5.2.7	Zonas térmicas e superfícies (<i>Thermal Zones and Surfaces</i>).....	99
5.2.8	Ganhos internos (<i>Internal Gains</i>).....	99
5.2.9	Controlo de aquecimento e arrefecimento (<i>Zone HVAC Controls and Thermostats</i>).....	100
5.2.10	Definição de equipamentos AVAC (<i>Zone HVAC Forced Air Units</i>)	101
5.2.11	Ligação de Equipamentos AVAC (<i>Zone HVAC Equipment Connection</i>)	101
5.2.12	Relatórios (<i>Reports</i>)	102
5.3	Análise do comportamento térmico da célula teste	102
5.3.1	Célula teste localizada em Lisboa	102
5.3.1.1	Análise da variação da temperatura interior da célula teste	102
5.3.1.2	Análise das necessidades energéticas da célula teste	105
5.3.1.2.1	Análise das necessidades energéticas com e sem película selectiva	106
5.3.2	Célula teste localizada em Guimarães.....	108
5.3.2.1	Análise da variação da temperatura interior da célula teste	108
5.3.2.2	Análise das necessidades energéticas da célula teste	110
5.3.2.2.1	Análise das necessidades energéticas com e sem película selectiva	111
5.4	Poupança económica	112
5.4.1	Célula teste localizada em Lisboa	112
5.4.2	Célula teste localizada em Guimarães.....	113
5.5	Análise custo benefício das soluções.....	113
5.6	Emissão de gases	115
5.7	Discussão de resultados	118
6	Conclusões.....	121
6.1	Conclusão	121
6.2	Desenvolvimentos Futuros	122
7	Bibliografia	123
8	Anexos	129
8.1	Anexo I	131
8.2	Anexo II.....	135

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Fases e medidas de intervenção do processo sustentável	9
Quadro 2.2 - Práticas para a boa gestão de resíduos de construção e demolição.....	22
Quadro 3.1 – Estratégias Bioclimáticas	67
Quadro 3.2 - Estratégias bioclimáticas para o Clima I1-V2	69
Quadro 3.3 - Estratégias bioclimáticas para o Clima I2-V2	70
Quadro 4.1 - Principais vantagens e inconvenientes da parede Trombe.....	78
Quadro 5.1 - Funcionamento das persianas para a célula teste em Lisboa	96
Quadro 5.2 – Funcionamento das persianas para a célula teste em Guimarães	96
Quadro 5.3 - Funcionamento da persiana inserida na parede Trombe para a célula teste em Lisboa.....	96
Quadro 5.4 - Funcionamento da persiana inserida na parede Trombe para a célula teste em Guimarães.....	96
Quadro 5.5 – Solução construtiva da parede Trombe	98
Quadro 5.6 – Solução construtiva da parede dupla com envidraçado	98
Quadro 5.7 – Solução construtiva da parede dupla.....	98
Quadro 5.8 - Ganhos Internos durante todo o ano	100
Quadro 5.9 – Necessidade energética global para a célula teste em Lisboa	106
Quadro 5.10 – Características da película selectiva utilizada no <i>EnergyPlus</i>	107
Quadro 5.11 – Necessidade energética global para as duas opções	107
Quadro 5.12 – Necessidade energética global para Guimarães	111

Quadro 5.13 – Necessidade energética global para as duas opções	112
Quadro 5.14 – Necessidade energética global e custo anual (Lisboa)	112
Quadro 5.15 - Necessidade energética e custo anual (Guimarães)	113
Quadro 5.16 – Custo total das soluções ao fim de 20 anos	114
Quadro 5.17 – Custo total das soluções ao fim de 20 anos	114
Quadro 5.18 - Emissão de gases CO ₂ para a célula teste em Lisboa	116
Quadro 5.19 - Emissão de gases CO ₂ para a célula teste em Guimarães	118

Índice de Figuras

Figura 2.1- Objectivos da sustentabilidade na sua tripla dimensão	7
Figura 2.2 - Ciclo de vida do processo de construção sustentável	10
Figura 2.3 – Taxa de dependência energética em Portugal	13
Figura 2.4 - Evolução do consumo de Energia Primária em Portugal	13
Figura 2.5 – Consumo energético por sector em Portugal em 2007	14
Figura 2.6 - Distribuição do consumo energético no sector dos edifícios residenciais em Portugal	15
Figura 2.7 – Localização da parede Trombe no alçado Sul da Casa Vale Rosal	24
Figura 2.8 - Corte da parede Trombe utilizada na Casa Vale Rosal	24
Figura 2.9 – Paredes Trombe numa habitação do Condomínio Jade em Sintra.....	25
Figura 2.10 – Paredes Trombe no edifício de habitação PLEA 88 em Vila do Conde	25
Figura 2.11 - Modelo genérico de uma ferramenta de suporte à concepção de edifícios sustentáveis.....	27

Figura 2.12 - Abordagem integrada ao ciclo de vida de um edifício	28
Figura 3.1 – Movimento de translação da Terra	40
Figura 3.2 – Ângulos de altitude solar (γ), azimuth solar (α) e incidência (θ)	41
Figura 3.3 – Lei do cosseno	41
Figura 3.4 - Percurso do sol durante o dia ao longo do ano	42
Figura 3.5 - Diferente posição do sol nas estações de Verão e Inverno.....	43
Figura 3.6 - Percurso do Sol entre as 8h e 16h na estação de Inverno	43
Figura 3.7 - Percurso do Sol no Verão entre as 10h e as 14h	44
Figura 3.8 - Radiação solar ao longo do ano (por orientações).....	44
Figura 3.9 - Exemplos de sistemas de protecção solar exteriores de janelas	45
Figura 3.10 – Mecanismos de transmissão de calor em edifícios	46
Figura 3.11 - Processos térmicos num edifício	46
Figura 3.12 – Mecanismo de transferência de calor por convecção	48
Figura 3.13 – Subdivisão da radiação incidente numa superfície transparente	50
Figura 3.14 – Coeficiente de reflexão em função do comprimento de onda	51
Figura 3.15 – Perfis de temperatura de uma parede pesada ao longo de um dia	52
Figura 3.16 - Desfasamento e amortecimento da onda de calor através de uma parede	53
Figura 3.17 – Efeito da inércia térmica na temperatura do ar interior	53
Figura 3.18 - Exemplo de um sistema de ganho directo	59
Figura 3.19 – Exemplo de uma parede Trombe não ventilada.....	59

Figura 3.20 – Exemplo de uma parede Trombe ventilada	60
Figura 3.21 - Exemplo de um sistema de ganho isolado (Espaço Estufa)	60
Figura 3.22- Trocas higrotérmicas entre o Homem e a sua envolvente	62
Figura 3.23 – Carta bioclimática de Olgyay	63
Figura 3.24 – Diagrama original e as situações “vividas” fora do polígono de conforto	63
Figura 3.25 – Principais trocas higrotérmicas entre o homem e a construção	64
Figura 3.26 - Carta Bioclimática de Baruch Givoni	65
Figura 3.27 – Localização dos concelhos com clima I1-V2	68
Figura 3.28 - Localização dos concelhos com clima I2-V2	69
Figura 4.1 – Exemplo de uma parede Trombe não ventilada (PTNV)	74
Figura 4.2 - Parede Trombe não ventilada durante o Inverno.....	75
Figura 4.3 – Parede Trombe não ventilada no Verão.....	76
Figura 4.4 - Parede Trombe ventilada durante o dia no Inverno.....	77
Figura 4.5 – Localização das paredes Trombe no Alçado Sul da habitação	79
Figura 4.6 – Vista interior do vão envidraçado de maior dimensão	80
Figura 4.7 – Alçado Sul da habitação	80
Figura 4.8 – a)Alçado Sul da casa com sombreamento devido à vegetação circundante b)Presença de árvores de grande porte na fachada Sul da habitação	81
Figura 4.9 – a)Espessura da parede Trombe vista do interior da habitação	82
Figura 4.10 - As três linhas de aberturas solares segundo os três graus de privacidade da Casa Solar Passiva de Vale Rosal (adaptado)	82

Figura 4.11 - Conjugação da parede Trombe com a fuga da lareira na Casa Solar Passiva de Vale Rosal	83
Figura 4.12 - Colocação da película selectiva na face exterior da Parede Trombe	84
Figura 4.13 - Sombreamento da parede Trombe num dia de Primavera	84
Figura 4.14 - Monitorização de 2 a 11 de Julho 1996 (Verão)	85
Figura 4.15 - Monitorização de 21 Fevereiro a 7 Março 1997 (Inverno)	85
Figura 4.16 - Fachada Sul da casa termicamente otimizada	86
Figura 4.17 - Dados relevantes das características da CTO	86
Figura 4.18 - Corte vertical da CTO	87
Figura 4.19 - Temperatura do ar no Inverno na CTO	88
Figura 4.20 - Temperatura do ar no Verão na CTO	88
Figura 5.1 – Arquivos de entrada e saída do programa <i>EnergyPlus</i>	90
Figura 5.2 – Planta do edifício para o caso da utilização da parede Trombe	93
Figura 5.3 - Alçados da célula teste para o caso da parede de Trombe	93
Figura 5.4 – Zonamento climático de Inverno e Verão.....	95
Figura 5.5 – Definição das <i>schedules</i> no <i>Energy Plus</i>	97
Figura 5.6 - Definição do equipamento virtual	101
Figura 5.7 – Temperatura média mensal (célula teste em Lisboa).....	103
Figura 5.8 - Evolução da temperatura interior no dia 31 de Janeiro	104
Figura 5.9 - Evolução da temperatura interior no dia 15 de Julho	104

Figura 5.10 – Necessidade nominal de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) para as três soluções construtivas na fachada Sul da célula teste em Lisboa.....	105
Figura 5.11 - Necessidades de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) por ano com e sem película	107
Figura 5.12 – Temperatura média mensal (célula teste em Guimarães)	108
Figura 5.13 - Evolução da temperatura interior no dia 12 de Janeiro	109
Figura 5.14 - Evolução da temperatura interior no dia 9 de Julho.	109
Figura 5.15 – Necessidade nominal de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) para as três soluções construtivas na fachada Sul da célula teste em Guimarães.	110
Figura 5.16 – Necessidade nominal de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) com e sem película	111
Figura 5.17 - Emissão anual de gases de efeito de estufa associadas à energia primária para climatização (célula teste em Lisboa)	117
Figura 5.18 - Emissão anual de gases de efeito de estufa associadas à energia primária para climatização (célula teste em Guimarães)	118
Figura 8.1 – Modelação no <i>EnergyPlus</i> da célula teste com parede Trombe	133
Figura 8.2 – Modelação no <i>EnergyPlus</i> da célula teste com parede dupla	133
Figura 8.3 - Modelação no <i>EnergyPlus</i> da célula teste com “parede dupla e envidraçado” ..	134

Notações

ADENE - Agência para a Energia.

BEPAC - Building Environmental Performance Assessment Criteria. Sistema de avaliação de certificação energética do Canadá.

BREEAM - Building Research Establishment Environmental Assessment Method. Sistema de avaliação de certificação energética do Reino Unido.

CAD - Computer Aided Design

CASBEE - Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency. Sistema de avaliação de certificação energética do Japão.

DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia

EPS - Poliestireno expandido moldado

GMT - Greenwich Mean Time

IEA - International Energy Agency

INETI - Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologias Industrial.

ITE 50 - Coeficientes de Transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios.

LCA - Análise de Ciclo de Vida.

LEED - Leadership in Energy & Environmental Design.

LIDERA - Liderar pelo Ambiente. Sistema de avaliação de sustentabilidade em Portugal.

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

NABERS - National Australian Buildings Environmental Rating System. Sistema de avaliação de certificação energética da Austrália.

NIST - National Institute of Standards and Technology.

PTNV - Parede Trombe não ventilada

PTV - Parede Trombe ventilada

RCCTE - Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios.

RCD - Resíduos de Construção e Demolição.

RGGR - Regime Geral de Gestão de Resíduos.

RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios.

SIRER - Sistema Integrado de Registo Electrónico de Resíduos.

SSP - Sistema Solar Passivo.

WMO - World Meteorological Organization

USGBC - United States Green Building Council.

Simbologia

A – Área do elemento

A_p – Área útil de pavimento

F_f – Factor de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado

g_{\perp} – Factor solar dos vãos envidraçados

J – Joule

K – Kelvin

M_{si} – Massa superficial útil

m_t – Massa total do elemento (do isolamento para o interior)

N_{ic} – Necessidade nominal de aquecimento

N_{vc} – Necessidade nominal de arrefecimento

N_{tc} – Necessidades globais nominais de energia primária

R – Resistência térmica

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior

R_{si} – Resistência térmica superficial interior

U – Coeficiente de transmissão térmica

α – Coeficiente de absorção

ρ – Coeficiente de reflexão

τ – Coeficiente de transmissão

λ – Condutibilidade térmica

1 Introdução

1.1 Apresentação do tema

As preocupações com as questões ambientais do planeta, o esgotamento previsível dos recursos naturais e o crescente aumento do consumo de energia, têm vindo a agravar-se nos últimos anos. O aumento de temperatura média do planeta observado desde o início do século XX tem origem na produção crescente de gases do efeito estufa, gases esses, decorrentes em grande parte da queima de combustíveis fósseis e das actividades humanas desenvolvidas.

Com o crescimento da população mundial e o desenvolvimento económico e social dos países aumenta também o nível de poluição e de produção de resíduos impondo-se a adopção de medidas de modo a controlar e diminuir as emissões dos gases que provocam o aumento da temperatura média do planeta.

O sector da construção é uma das actividades humanas com grande impacto sobre o meio ambiente. O consumo de recursos não renováveis e de energia associados ao sector dos edifícios nas suas diferentes fases de construção e utilização torna-o como o mais importante e naquele em que todos os contributos têm importância determinante para o planeta. Deste modo a introdução no desenvolvimento da sua acção dos princípios de Desenvolvimento Sustentável permitirá reforçar a redução dos consumos energéticos ligados directa e indirectamente ao sector.

O tema da presente dissertação enquadra-se no contributo para uma resposta a esta problemática dado o sector da construção ser um dos que mais contribui para o consumo de energia como já referido. A procura de conforto térmico interior nos edifícios por parte dos seus utilizadores aumentou consideravelmente os consumos energéticos através da aplicação e utilização de equipamentos mecânicos. Para inverter esta problemática, é necessário alterarem-se práticas de projecto introduzindo o recurso a fontes de energias renováveis, como o Sol, que poderá ser conseguido com sucesso através da aplicação de paredes Trombe nos edifícios.

O sistema de parede de Trombe é uma solução alternativa e eficaz aos equipamentos mecânicos de aquecimento existentes, os quais apresentam consumos energéticos associados ao seu funcionamento ao longo de todo o ciclo de vida do edifício.

1.2 Objectivo

O consumo energético no sector da construção tem vindo a aumentar existindo edifícios que apenas são considerados com condições de habitabilidade em resultado do uso de equipamentos mecânicos nos mesmos. Surge, assim, a oportunidade de contribuir para a necessidade de melhorar as condições de conforto no interior das habitações sem recurso à utilização de equipamentos mecânicos que consomem energia, situação em que enquadra a construção sustentável como importante veículo para alcançar esse objectivo.

A presente dissertação visa ainda desenvolver a temática da construção sustentável, em particular pelo estudo da contribuição para a redução do consumo energético nos edifícios pela introdução de sistema solar passivo - a parede Trombe – contributo esse analisado sob o ponto de vista do desempenho térmico de uma célula teste. O estudo será realizado através da análise do comportamento térmico de uma célula teste situada em duas localidades (Lisboa e Guimarães) com três soluções construtivas distintas (parede de Trombe, parede dupla com envidraçado, parede dupla) localizadas na parede de orientação Sul da mesma, recorrendo à utilização de um método de análise dinâmica - programa *EnergyPlus*.

Os resultados da análise do comportamento térmico da célula teste obtidos pelo programa *EnergyPlus*, do ponto de vista das necessidades energéticas globais para as três soluções são comparados entre si e justificados evidenciando a sua relevância para o objectivo da investigação.

O trabalho visa ainda reflectir numa base de análise custo benefício entre as três soluções construtivas adoptadas, análise essa em que serão calculados os custos de construção e de manutenção para um ciclo de 20 anos. Por fim é realizada uma análise e uma comparação das emissões de gases de CO₂ para a atmosfera entre as três soluções construtivas simuladas através do programa *EnergyPlus*.

1.3 Estrutura do trabalho

Visando a temática de pesquisa do trabalho, o estudo foi dividido em seis capítulos.

No primeiro capítulo faz-se uma abordagem introdutória do presente estudo em que se define os objectivos e estrutura do trabalho.

O segundo capítulo baseia-se na revisão histórica do desenvolvimento sustentável no qual é abordado o tema da construção sustentável analisando aspectos como o elevado consumo de energia no sector da construção, a gestão da água, os materiais a utilizar, a desconstrução e é, ainda, realizada uma contextualização histórica da parede Trombe

apresentando alguns exemplos. Ainda neste capítulo são descritos os principais sistemas de avaliação da construção sustentável.

No terceiro capítulo é descrito como a energia solar se pode tornar importante na redução do consumo de energia nos edifícios através da introdução de soluções solares passivas nos mesmos. Ainda neste capítulo são descritos os parâmetros térmicos associados aos edifícios.

No quarto capítulo é desenvolvido o estudo da parede Trombe sendo descritos os sistemas de funcionamento e construtivo da mesma. Ainda neste capítulo são descritas as vantagens e os inconvenientes do sistema de parede Trombe.

No quinto capítulo, através do software *EnergyPlus*, método de análise dinâmica, realiza-se uma análise do comportamento térmico de uma célula teste célula teste para duas localidades (Lisboa e Guimarães) e efectua-se uma análise das necessidades energéticas anuais da mesma com três soluções construtivas diferentes (parede Trombe, parede dupla com envidraçado, parede dupla) na parede Sul da mesma. Neste capítulo é ainda efectuado uma análise económica e uma análise custo benefício na qual são detalhados os custos de construção e manutenção das três soluções construtivas estudadas. Ainda neste capítulo é efectuada uma análise da poupança energética e da emissão de gases CO₂ para as três soluções construtivas estudadas.

No sexto capítulo reúnem-se as principais conclusões do trabalho e são abordados os desenvolvimentos futuros.

2 Desenvolvimento Sustentável

2.1 Enquadramento

O conceito de sustentabilidade tem vindo a sofrer alterações desde os finais da década de 70 até aos dias de hoje. Naquela época, o conceito de sustentabilidade assentava na lógica da sustentação do modelo de desenvolvimento da sociedade, através de uma visão economicista com reduzidas preocupações ambientais. É, também, nesta altura que começam a surgir as primeiras preocupações com a preservação do meio ambiente do planeta. No final da década de 80, o conceito de sustentabilidade é apresentado no relatório Brundtland (1987) numa perspectiva de deixar o planeta com condições de habitabilidade para as próximas gerações: *“um desenvolvimento que satisfaça as necessidades do presente, sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras darem resposta às delas”* ^[6].

A definição surgida neste relatório é filosófica e política, não fornecendo bases para a tomada de decisões sobre a compatibilidade de programas e tecnologias com os seus objectivos. No entanto, há duas ideias principais em que o relatório se baseia: a da preservação dos recursos existentes e a da necessidade de programar o rumo da sociedade, conciliando esse vector através de uma abordagem integrada dos problemas. Este relatório, como já referido, não apresentou uma lista de acções a serem tomadas pelos Estados nem definiu metas a serem efectuadas a nível internacional, apenas estimula a que sejam adoptadas. Entre as preocupações apontadas por este relatório constam a diminuição do consumo de energia, o desenvolvimento de tecnologias para uso de fontes energéticas renováveis¹ e o aumento da produção industrial nos países não industrializados com base em tecnologias ecologicamente adaptadas ^{[46], [52]}.

Em 1992, na Conferência Eco-92 ocorrida no Rio de Janeiro, surge a Agenda 21. Trata-se de um documento que envolveu 118 países e que estabeleceu a importância de cada país se comprometer a reflectir, global e localmente sobre a forma como os governos, empresas, organizações não governamentais e todos os sectores da sociedade poderiam cooperar em conjunto no estudo de soluções para os problemas sócio-ambientais. Este documento foi muito importante para a modificação do modo de pensamento da sociedade industrial na reinterpretação do conceito de progresso, promovendo a qualidade não considerando apenas a quantidade de crescimento, mas estando presente que os objectivos a definir devem promover a preservação ambiental e o desenvolvimento social. A Agenda 21 é

¹ Energia proveniente de fontes de energia não fósseis renováveis, nomeadamente eólica, solar, geotérmica, hídrica, entre outras. ^[15]

um plano de acção para ser adoptado global, nacional e localmente pelas organizações do sistema das Nações Unidas, governos e pela sociedade civil em todos os sectores em que a acção do homem tenha impacto no meio ambiente ^[6].

Segundo a Agenda 21 *“as necessidades de desenvolvimento com perspectivas a longo prazo, integrando os efeitos locais e regionais de mudança global no processo de desenvolvimento, e usando o melhor conhecimento científico e tradicional disponível”*. Deste modo, é da competência de cada país/região definir as suas próprias directrizes para o desenvolvimento sustentável, com base nos princípios da Agenda 21 ^[6].

No seguimento desta preocupação, em 1996, foi realizada em Istambul a Conferência das Nações Unidas onde surgiu a Agenda Habitat II. Esta agenda, possuindo também uma interpretação a nível local/regional da Agenda 21, demonstra uma preocupação da sustentabilidade dos aglomerados humanos, contendo várias secções dedicadas ao preocupante sector da construção civil e à forma como os governos nacionais devem encorajar a sua indústria a promover o conceito de sustentabilidade. Os objectivos da Habitat II, estão centrados em dois temas: *“um abrigo adequado para todos”* e *“desenvolvimento sustentável dos aglomerados humanos num mundo em urbanização”* ^[6].

Os seres humanos são o centro da preocupação para um desenvolvimento sustentável, assegurando o direito a uma vida produtiva, saudável e em harmonia com a natureza. Nas zonas densamente povoadas, especialmente em zonas urbanas onde vive a maior parte da população europeia, a agenda Habitat II reconhece a habitação como um dos requisitos essenciais para a qualidade de vida. É ainda referido nesta agenda, que os governos locais devem auxiliar a indústria a promover *“métodos de construção e o recurso a tecnologias disponíveis localmente, que sejam apropriados, acessíveis economicamente, eficientes e ambientalmente seguros em todos os países, em especial nos países em desenvolvimento aos níveis local, nacional, regional e sub-regional”*. Outro aspecto referido na agenda é que, os governos e o sector da construção devem apresentar acções no que diz respeito ao planeamento, concepção, construção, manutenção e reabilitação das habitações e também ao nível da produção de materiais.

O conceito de desenvolvimento sustentável pretende responder às necessidades presentes da sociedade e à satisfação de algumas necessidades humanas básicas. A alimentação, a água potável e o acesso à saúde podem originar um conjunto de problemas ambientais graves. A constante intensificação da agricultura para a produção de alimentos, aliada á consequente utilização de pesticidas e adubos ou o elevado consumo de água podem provocar danos no ambiente que têm de ser considerados ^[46].

Actualmente, o conceito de sustentabilidade encontra-se presente em vários sectores e a sua motivação ambiental passa pela diminuição do consumo de recursos, produção de resíduos e preservação da biodiversidade dos ecossistemas. O principal objectivo é que o consumo de energia, água e materiais ocorra a uma taxa possível de ser renovada, ou seja, mantendo-se de forma indefinida e sem impactes ambientais ^[46].

O prosseguimento do objectivo de satisfação das necessidades humanas sem afectar as gerações futuras, tem implicações na forma como esses recursos são utilizados no presente. Desde as actividades primárias, como a alimentação, até ao desenvolvimento das mais altas tecnologias, todas as actividades humanas têm impactes no ambiente. Dado que estas actividades criam uma utilização excessiva dos recursos naturais a capacidade de regeneração do planeta está a ser excedida.

Segundo Serageldin (1994), (citado por Pinheiro em 2006), os problemas ambientais existentes no nosso planeta resultam da acção do Homem, mas para a resolução dos mesmos, deverá ter-se em consideração os aspectos sociais que, como se sabe, integram o bem-estar individual, as relações interpessoais, as diferentes culturas e respectivos hábitos, motivos, estímulos e valores.

O esquema seguinte ilustra os objectivos de sustentabilidade a atingir por cada uma das áreas – ambiental, social e económica.

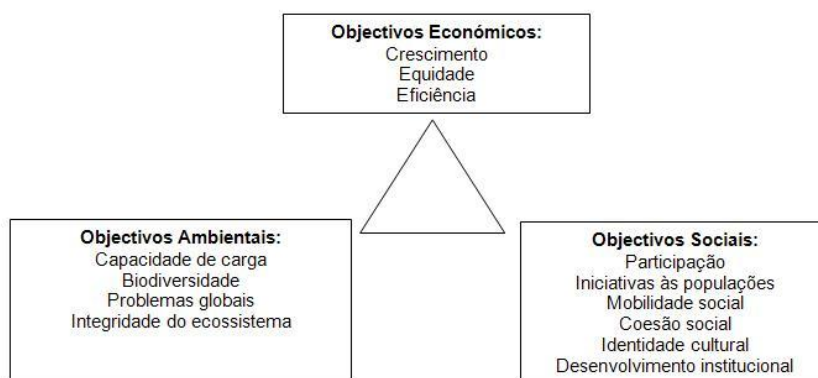


Figura 2.1- Objectivos da sustentabilidade na sua tripla dimensão ^[46]

2.2 Construção Sustentável

O sector da construção representa um dos sectores mais activos da economia global, registando ao longo das últimas décadas um crescimento acentuado. Trata-se de um sector em contínua actividade e faz transparecer a existência de uma desarticulação funcional entre as reais necessidades e expectativas da população e o parque habitacional disponibilizado ^[6].

As práticas associadas à actividade da construção de edifícios dão origem a graves consequências no nível de equilíbrio ambiental do planeta, nomeadamente, no esgotamento de recursos naturais não renováveis. O processo de produção do sector da construção utiliza cerca de 50% dos recursos naturais e contribui em mais de 50% para o volume global de resíduos ^[6].

Para assegurar o equilíbrio entre o ambiente natural e ambiente construído é urgente alterar o processo generalizado da construção, introduzindo novas práticas, onde o conceito de sustentabilidade esteja presente, e onde seja assegurado um reforço da dignidade humana e da justiça económica e social através das intervenções impostas. Para tal acontecer, é necessário aplicarem-se os princípios do desenvolvimento sustentável ao sector da construção, actuando em todas as fases do processo de construção, desde a extracção, transformação e transporte das matérias-primas, passando pelo projecto, construção, utilização e manutenção dos edifícios e infra-estruturas, até à gestão de resíduos e desconstrução final da vida útil dos edifícios ^[6].

Porém, a inexistência de um quadro legal regulador da actividade da construção que introduza o conceito de desenvolvimento sustentável faz com que a adopção de práticas de redução de consumo de recursos e de produção de resíduos esteja dependente de acções individuais, e da consciência de cada interveniente no processo. Para contribuir para a inversão desta tendência, a adopção de um processo metodológico de abordagem sequencial estruturado segundo os princípios do desenvolvimento sustentável, pode permitir uma redução de consumo de recursos, eliminação de desperdícios, para além de poder aumentar a qualidade de vida das populações ^[6].

Segundo Miguel Amado, em 2005, *“surge a oportunidade de formulação de um processo operativo de construção no sentido de minimizar os impactes sobre o meio ambiente, recursos naturais e consumos energéticos tentando sempre com a promoção da qualidade do conforto interior dos edifícios.”*

Assim, o processo de construção sustentável, ao longo de todo o seu ciclo de vida, visa aplicar os princípios do desenvolvimento sustentável, através da implementação de acções passivas, de processos construtivos rigorosos, da utilização de materiais renováveis e de uma

eficiente avaliação e monitorização. No sentido de minimizar os impactos sobre o meio ambiente, sobre os recursos naturais e os consumos energéticos tentando sempre promover a qualidade do conforto interior das habitações, surge a oportunidade da utilização de um processo operativo à construção sustentável.

Deste modo, a construção sustentável deve possuir um processo operativo que conduza a uma efectiva aplicação às diferentes fases do ciclo de construção do edifício desenvolvendo-se em quatro níveis de intervenção: Projecto, Construção, Utilização, Manutenção – os quais se desenvolvem em medidas orientadas para a sustentabilidade (Quadro 2.1) ^[6].

Quadro 2.1 - Fases e medidas de intervenção do processo sustentável ^[6]

Fases de Intervenção	Medidas de Intervenção
Projecto	<ul style="list-style-type: none"> • Adopção de soluções passivas para a conservação de energia e conforto ambiental • Sistema construtivo detalhado e exacta compatibilidade entre as especialidades
Construção	<ul style="list-style-type: none"> • Processo construtivo rigoroso e detalhado • Critério de selecção de produtos e materiais de construção • Impactes ambientais temporários
Utilização	<ul style="list-style-type: none"> • Controlo de usos e actividades • Procedimentos de utilização
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Definição de rotinas e procedimentos • Monitorização do nível de eficiência

Note-se que, na Figura 2.2, a Construção Sustentável assenta num processo cíclico que deve ser monitorizado em todas as suas fases, no sentido de tornar o processo mais eficiente, e garantir que os princípios de sustentabilidade são assegurados na concepção do projecto, que a construção segue os procedimentos adequados e que os edifícios são usufruídos de uma forma sustentável por parte dos seus utilizadores ^[6].

A análise do ciclo de vida dos edifícios é capital para avaliar o desempenho ambiental dos empreendimentos ao longo de toda a sua vida útil. A análise em questão realiza uma avaliação dos recursos ecológicos na fabricação de produtos, que mais tarde são avaliados e contrastados com base em critérios ambientais. Uma das vantagens desta análise é ter a possibilidade de ser utilizada como guia para profissionais do sector e administradores durante toda a vida útil do edifício ^[52].



Figura 2.2 - Ciclo de vida do processo de construção sustentável ^[6]

Charles Kibert, em 1994, apresentou pela primeira vez o termo de *Construção Sustentável* para descrever as responsabilidades da indústria da construção no que respeita ao conceito e aos objectivos da sustentabilidade. Na 1ª Conferência Mundial sobre Construção Sustentável em 1994, Kibert afirmou que a construção sustentável é a “*criação e gestão responsável de um ambiente construído saudável, tendo em consideração os princípios ecológicos (para evitar danos ambientais) e a utilização eficiente de recursos*”.

Para o autor, os recursos necessários à construção são os materiais, o solo, a energia e a água, e baseado neles, estabeleceu seis princípios base da construção sustentável ^[6]:

- Reduzir o consumo de recursos;
- Maximizar a reutilização de recursos;
- Utilizar recursos renováveis e recicláveis;
- Proteger o ambiente natural;
- Eliminar os materiais tóxicos e os subprodutos em todas as fases do ciclo de vida;
- Fomentar a qualidade, ao criar o ambiente construído.

Das estratégias definidas por Charles Kibert, pode-se fazer um destaque especial a AGENDA 21 especificamente dirigida para a construção sustentável em 1999. Trata-se de um documento que envolve vários países, definindo as bases para a compreensão do conceito de desenvolvimento sustentável, onde não são tratadas apenas questões de preservação da natureza, mas também questões ligadas à pobreza, ao crescimento económico, à industrialização, às alterações nos padrões de produção e consumo, assim como a adopção de novos modelos e instrumentos de gestão ^[52].

A Agenda 21 para a Construção Sustentável, adoptada pelo *International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB)* em 1999, pretendeu ser um elemento intermediário entre as Agendas internacionais e as Agendas nacionais e locais, no

que se refere ao sector da construção. Na Agenda 21 sobre a Construção Sustentável foram definidos três objectivos principais ^[46]:

- Criar uma estrutura de abordagem e terminologia que adicione valor às agendas nacionais ou regionais e sub-sectoriais;
- Criar uma agenda para actividades locais realizadas pelo CIB e pelas organizações internacionais suas parceiras;
- Criar um documento fonte para a definição de actividades de I&D (Investigação e Desenvolvimento).

Assim, esta Agenda 21 para a Construção Sustentável aborda o tema do desenvolvimento sustentável e a construção sustentável a nível global e das necessidades do mercado, do funcionamento dos edifícios, dos recursos, da melhoria do processo construtivo, do urbanismo, dos aspectos sociais, entre outros. Sendo assim, os maiores desafios que o sector da construção civil enfrenta são ^[46]:

- Promoção da eficiência energética;
- Redução do uso e consumo de água potável;
- Selecção de materiais com base no seu desempenho ambiental;
- Contribuição para um desenvolvimento urbano sustentável.

Charles Kibert, no Simpósio promovido pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável em 2009, referiu que num futuro próximo a indústria da construção civil deverá estar preparada para adoptar inovações tecnológicas como forma de reduzir os impactos ambientais das suas actividades. *“Já está na hora de pensarmos em modelos de baixa emissão de carbono e eficiência energética”*, acrescentou Kibert.

Para Kibert, nos últimos anos tem existido uma crescente procura por projectos de “greenbuildings”, concluindo-se assim que há mercado para esse tipo de empreendimento. *“Alemanha e Suécia, por exemplo, já estão a produzir uma segunda geração de prédios verdes, que diminuem a utilização de materiais provenientes de combustíveis fósseis”*, (Charles Kibert, 2009) ^[6].

Segundo Manuel Pinheiro, *“construção sustentável é (...) encontrar eficiência nos sistemas e nos materiais, que resultem em menores utilizações de energia e que também aumentem a vida dos edifícios para além dos tradicionais 50 anos de vida.”* ^[47]

É também definido por Manuel Pinheiro que, *“Independentemente do seu papel, do desenho, do processo assim como do seu produto, as construções devem ser um reflexo dos*

processos naturais perspectivados numa lógica complementar, ao invés de destruir os sistemas naturais. Esta lógica de construção sustentável não é binária no sentido de ser ou não ser, mas progressiva e por níveis, havendo assim níveis crescentes de sustentabilidade” [47].

Apesar da Construção Sustentável não ser, ainda, o tipo de construção predominante em Portugal, em alguns países estes princípios já são comuns e bastante adoptados competindo a todos os intervenientes no sector da construção fazer com que rapidamente este tema seja conhecido e colocado em prática em todo o processo de construção [6].

A construção sustentável de edifícios novos e a reabilitação sustentável de edifícios existentes pode iniciar uma nova fase no sentido de uma melhoria do desempenho ambiental das cidades e da qualidade de vida dos seus cidadãos. Esta melhoria do desempenho ambiental das cidades pode ser alcançada apostando na gestão de energia, no incremento de programas de financiamento que apoiem o desenvolvimento e na implementação da gestão da procura de energias renováveis [59].

Construir uma casa sem danificar o ambiente é o objectivo a alcançar e para isso é necessário seguir o caminho da construção sustentável. Esta não só obriga à escolha de materiais de baixo impacto ambiental mas também de tecnologias que permitam à casa funcionar sem fazer perigar recursos naturais como a água e a energia.

2.2.1. Energia

O consumo energético é um dos maiores problemas da actualidade porque conduz a um esgotamento progressivo das reservas de combustíveis fósseis, que são a base do modelo de desenvolvimento actual.

O sector energético é o principal emissor de gases de efeito de estufa como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). Em 1997, com a assinatura do protocolo de Quioto, foi estabelecido um valor limite de emissão de CO₂ para cada um dos países subscritos do acordo, tendo sido associadas taxas a pagar, nos casos em que os valores fossem excedidos. Com esta medida pretendeu-se abrandar a tendência de crescimento das emissões no planeta [6].

O desenvolvimento dos países é um dos factores que contribui para o aumento das emissões de gases de efeito de estufa e o rápido desenvolvimento de países como China e Índia poderá acentuar esta problemática num futuro próximo.

Portugal é um país com escassos recursos energéticos próprios como o petróleo, o carvão e o gás, que são os recursos que asseguram a maior parte das necessidades energéticas dos países desenvolvidos. Esta situação de escassez de recursos conduz a uma elevada

dependência energética proveniente do exterior (81,2% no ano de 2009), nomeadamente de fontes primárias de origem fóssil (Figura 2.3). Analisando estes valores, é necessário aumentar a contribuição das energias renováveis no nosso país: hídrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa [22].

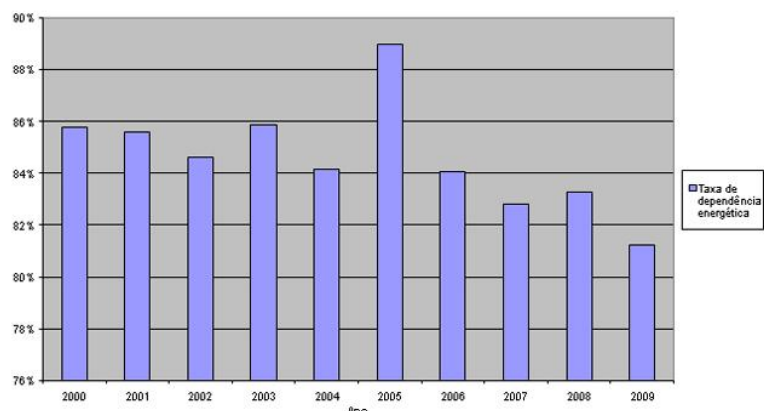


Figura 2.3 – Taxa de dependência energética em Portugal

A Figura 2.4 ilustra a evolução do consumo de energia primária em Portugal no período entre 2000 e 2009.

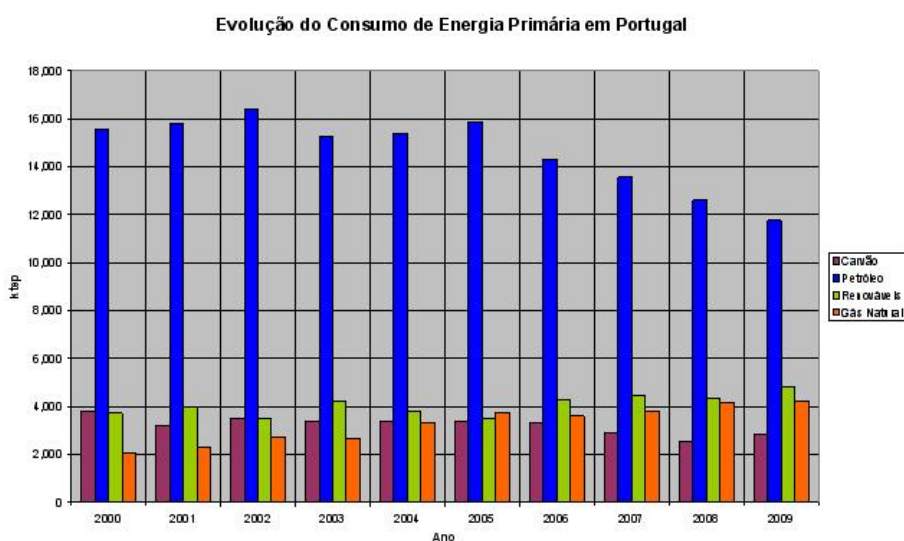


Figura 2.4 - Evolução do consumo de Energia Primária em Portugal [22]

O petróleo continua a ter um papel essencial na estrutura de abastecimento de Portugal e em 2009 representava 48,7% do consumo total de energia primária². O gás natural, carvão e energias renováveis representavam, respectivamente, 15%, 11,3% e 17,1% [22].

² Energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis que não passou por um processo de conversão ou transformação.

O sector da construção é responsável por um elevado consumo de energia produzindo grandes quantidades de resíduos e emissões de dióxido de carbono (CO₂). Para solucionar esta questão é fundamental desenvolver o sector da construção, construindo edifícios menos poluentes na sua concepção e também na sua utilização. O dióxido de carbono (CO₂) está associado ao efeito de estufa global, sendo esta uma das áreas onde existe uma associação entre os valores emitidos e o crescimento económico [6].

O elevado consumo de energia verificado nas habitações deve-se, em geral, ao desconforto sentido pelos ocupantes no interior das mesmas. As diferenças de temperatura existentes no interior da habitação ao longo do ano criam desconforto nos ocupantes levando-os a utilizar sistemas de climatização frequentemente caros e de elevado consumo energético. Actualmente verifica-se uma maior permanência no interior dos edifícios, por parte dos seus utilizadores, devido aos novos tipos de actividades e duração dos períodos de lazer por parte da população. Esta prática, dá origem a um aumento de consumo de energia na procura de um eficiente conforto no interior das habitações [7].

Em 2007, o consumo energético por sector em Portugal (Figura 2.5), estava distribuído por: Transportes 36,4%, Indústria 29,2%, Doméstico 17,1%, Serviços 12,2% e 5,1% nos outros sectores onde se inclui agricultura e construção e obras públicas [22].

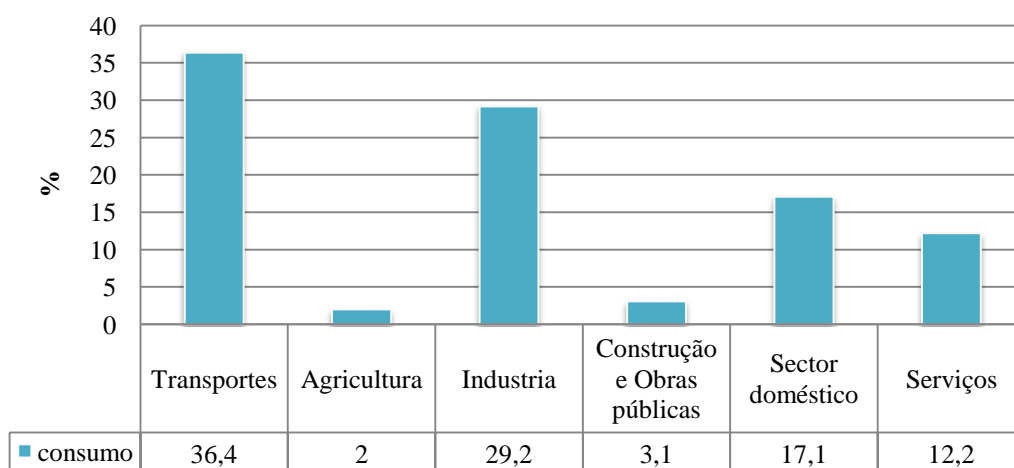


Figura 2.5 – Consumo energético por sector em Portugal em 2007

Em Portugal, os edifícios foram responsáveis pelo consumo de 5,8 Mteps (milhões de toneladas equivalente de petróleo), representando cerca de 30% do consumo total de energia primária do país e 62% dos consumos de electricidade no ano de 2005. O sector residencial com cerca de 3,3 milhões de edifícios, contribuiu com 17% dos consumos de energia primária em termos nacionais, representando cerca de 29% dos consumos de electricidade, o que evidencia a necessidade de uma atenção particular à eficiência energética dos equipamentos consumidores de electricidade como forma de moderação dos consumos [23].

Segundo a Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG) existe, no sector doméstico, um aumento do consumo de energia eléctrica por unidade de alojamento comparando os valores de 2630 kWh/alojamento em 2009 contra 2510 kWh/alojamento no ano de 2008. Relativamente às formas de energia utilizadas, verifica-se uma diminuição nos consumos dos produtos de petróleo e um aumento do gás natural ^[22].

Nos últimos anos, no sector residencial, a qualidade dos edifícios e do conforto a eles associado tem aumentado e as necessidades de conforto térmico (aquecimento e arrefecimento) são comodidades que foram sendo colocadas gradualmente à disposição dos utilizadores dos edifícios de habitação. No entanto, este nível mais elevado de conforto traduz-se normalmente num acréscimo de investimento e num maior consumo de energia com repercussão no aumento de gases que contribuem para o aquecimento global ^[23].

O consumo de energia nos edifícios residenciais (Figura 2.6) distribui-se aproximadamente da seguinte forma: cozinhas e águas quentes sanitárias 50%, aquecimento e arrefecimento 25%, iluminação e equipamentos electrodomésticos 25% ^[23].

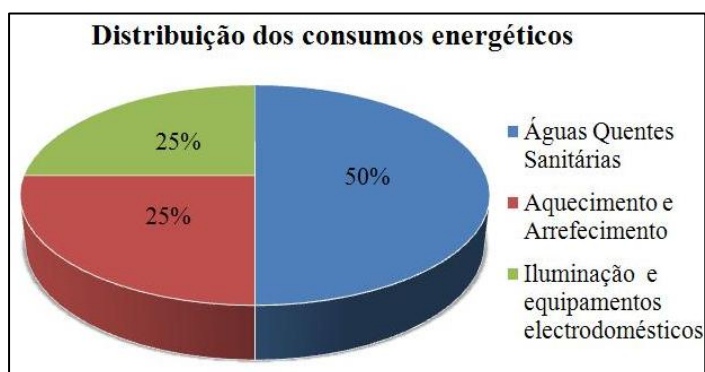


Figura 2.6 - Distribuição do consumo energético no sector dos edifícios residenciais em Portugal

A análise destes valores permite retirar algumas conclusões de forma a melhorar a eficiência térmica e energética dos edifícios ^[23]:

- O recurso à energia solar térmica (produção de origem renovável) irá reduzir os custos elevados referentes à produção de águas quentes sanitárias, cuja fonte se divide entre o gás e a electricidade;
- Os consumos associados ao conforto térmico (aquecimento e arrefecimento) constituem uma via de intersecção no sector.
- A melhoria da eficiência energética do parque de equipamentos e iluminação constitui um alvo de intervenção onde as economias de energia poderão ser significativas.

Os seguintes consumos de energia têm potencial para serem reduzidos:

- O aquecimento de águas sanitárias pode ser obtido com recurso a painéis solares;
- Os gastos com o aquecimento das habitações pode ser reduzido através do recurso a sistemas solares passivos (parede Trombe, espaço estufa, etc.);
- A iluminação e climatização podem ser melhor geridas com a aplicação de normas e princípios que promovam a utilização racional de energia.

Os consumos energéticos médios relativos ao conforto ambiental não são muito significativos em Portugal mas têm vindo a aumentar a um ritmo elevado e tendem a generalizar-se. Caso não surja, em breve, na construção dos edifícios uma aplicação rigorosa dos princípios, regras ou normas que promovam a utilização racional de energia, os níveis de conforto tenderão a ser atingidos cada vez mais recorrendo a sistemas de condicionamento de ar interior, o que fará aumentar os consumos globais no sector ^[41].

A elevada preocupação com o meio ambiente levou ao aparecimento de regulamentos para elevar as condições de conforto no interior dos edifícios e em Portugal, a legislação tem dado bastante importância aos consumos energéticos decorrentes do aquecimento/arrefecimento dos edifícios e, de forma a racionalizar estes consumos, tem-se assistido à aprovação de regulamentos relativos ao comportamento térmico/energético dos edifícios cada vez mais restritivos. Actualmente, evidencia-se a aprovação do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) ^[21], do Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios (RSECE) ^[20] e a implementação do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios.

A redução do consumo de energia é, portanto, uma prioridade no panorama actual do sector da construção e a Construção Sustentável adopta soluções tecnológicas e materiais ecológicos para contribuir para esse objectivo. Uma das soluções adoptadas pela Construção Sustentável para reduzir o consumo de energia dos edifícios é a utilização de soluções passivas.

2.2.2. Materiais

As actividades do Homem consomem e poluem sempre numa lógica de devastação sem paralelo. Com apenas 5% da população mundial, os Estados Unidos consomem cerca de um terço dos materiais do planeta. O resultado final deste acontecimento é a evolução para um planeta poluído até ao limite ^[61]. Actualmente poucos edifícios são concebidos de forma a beneficiar da energia e dos materiais de forma natural e optimizada. Na concepção de uma habitação têm sido negligenciadas as capacidades naturais de controlo, armazenamento e

distribuição de energia que o espaço e os materiais construtivos possuem, bem como a potencialidade de serem criadas soluções novas ou reencontrar técnicas antigas ^[41].

A escolha dos materiais deveria obedecer a critérios de preservação, recuperação e responsabilidade ambiental. É importante e deveriam ser considerados os tipos de materiais que estão de acordo com o local e que podem contribuir para conservar e melhorar o meio ambiente onde irão ser inseridos. As características como a durabilidade, reutilização e reciclagem são importantes e é necessário ter em conta para a escolha dos materiais a utilizar. A durabilidade de um dado material é uma característica que os intervenientes na escolha dos produtos a utilizar devem ter em conta porque, quanto maior for a durabilidade de um material, maior será a sua vida útil e, conseqüentemente menor será o seu impacto ambiental ^[61].

Para sistematizar as potencialidades ecológicas dos edifícios, no campo da energia e materiais, é necessário o estudo e a exemplificação da aplicação das estratégias que coloquem em prática os princípios de eficiência energética e de gestão e selecção ecológica dos materiais de construção, demonstrando a viabilidade da sua integração no edifício ^[41].

Na escolha dos materiais a opção por materiais da região contribui para a diminuição da energia incorporada dos materiais sendo esta energia a despendida na extracção, fabrico e transporte dos materiais promovendo e dinamizando, deste modo, a economia local ou regional. Na opção dos materiais deverão ser considerados materiais, preferencialmente, naturais ou reciclados e possivelmente recicláveis no futuro.

2.2.3. Gestão da Água

O constante crescimento da urbanização e o considerável desenvolvimento tecnológico e industrial verificado especialmente na segunda metade do século XX, têm determinado alterações significativas nos padrões de vida da sociedade actual, que se têm reflectido na elevada procura de água e na descarga no ambiente (particularmente nas águas superficiais e subterrâneas) de quantidades cada vez mais superiores de resíduos provenientes das suas actividades ^{[64],[49]}.

Desde 1950 que o consumo de água mais que triplicou, acompanhando o contínuo crescimento da população mundial. Como resposta a esta constante procura têm sido realizados grandes projectos hidráulicos, onde se destacam grandes barragens, transvazes entre bacias hidrográficas e obras de captação de águas subterrâneas. No ano de 1950 existiam cerca de 5000 grandes barragens (com altura superior a 15 metros), sendo actualmente o seu número de cerca de 45000, o que significa que nestes 50 anos se construíram, em média, duas grandes barragens por dia. Se a estas acrescentarmos as cerca de 800000 pequenas barragens,

verificamos que as respectivas albufeiras representam uma capacidade de armazenamento de cerca de 20% do escoamento total global anual. Com o excesso de exploração de águas subterrâneas para abastecimento público são captadas quantidades superiores àquelas que a natureza consegue repor e este facto origina um défice que também se repercute na alimentação natural dos rios através do escoamento dos aquíferos ^{[64],[58]}.

As consequências das alterações climáticas, traduzidas num aquecimento gradual e global do planeta vão introduzir alterações na hidrologia da maioria dos rios, o que implicará uma precaução acrescida na utilização dos respectivos padrões de escoamento registados no século XX em processos de planeamento para o século XXI ^[64].

A concentração urbana e o rápido desenvolvimento económico determinaram uma contínua degradação da qualidade dos recursos hídricos disponíveis, sendo sobretudo na Europa e na América do Norte, a partir de 1960, que surgiram as primeiras preocupações relativamente ao controlo da poluição da água, através da publicação de legislação específica. De início, as preocupações com a problemática da qualidade da água, baseavam-se em conceitos económicos de minimização de custos associados às doenças que eram transmitidas por via hídrica e de custos no tratamento de água indispensáveis a vários processos de fabrico nas indústrias. Estas preocupações foram, gradualmente, ganhando novas dimensões baseadas nos conceitos de protecção da Natureza. Assumindo a água um carácter determinante para os indivíduos e para as sociedades, todos os esforços devem ser mobilizados para que o eventual conflito entre a constante procura da água e as necessidades ecológicas gerais, sempre numa perspectiva de colocar o Homem no centro do ecossistema global, seja devidamente solucionado ^{[64],[58]}.

Uma boa gestão no sector dos recursos hídricos é essencial e segundo o 3º Relatório Global das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (Março 2009, Istambul), alguns países já iniciaram a integração da gestão de recursos hídricos com os seus respectivos planos e políticas de desenvolvimento perante um cenário de escassez de água ^[13].

A água é de extrema importância para o funcionamento do sistema global do nosso planeta. Permanece em constante ciclo através do qual se desloca e renova. Da totalidade de água existente no planeta Terra, aproximadamente 97% é água salgada, 3% de água doce em que, 2,1% estão armazenados nas calotes polares e apenas 0,9% estão no subsolo, rios e zonas superficiais do solo ^{[49], [13]}.

A poluição é a grande responsável por tornar a água imprópria para consumo, sendo os principais culpados a agricultura, a indústria e as actividades domésticas. Os químicos utilizados na agricultura como fertilizantes, pesticidas e herbicidas penetram no solo e atingem as águas subterrâneas e consequentemente as superficiais. As águas subterrâneas,

uma vez poluídas, são muito difíceis de purificar. Uma operação de limpeza numa região poderá levar décadas e ter elevados custos para ficar completa devido ao seu lento movimento e volume. As chuvas ácidas provocadas pela poluição e pelas centrais eléctricas contaminam o solo, as culturas, os rios e lagos transportando substâncias perigosas até locais muito distantes do seu local de precipitação ^[13].

Numa perspectiva de conservação e reutilização da água, é necessário aumentar a sua produtividade, tendo como objectivo a duplicação da mesma nos próximos 25 anos, isto é, que seja possível obter duas vezes o serviço ou benefício de cada litro de água captada no ambiente natural. Trata-se de um objectivo ambicioso e que pode ser concretizado através de medidas para a poupança de água nos usos domésticos, industriais, comerciais, agrícolas e em arranjos urbanísticos, como por exemplo: redução de perdas em sistemas de abastecimento, recarga de aquíferos, despoluição de massas hídricas, aplicação de novos tarifários, reutilização de águas residuais tratadas, o encaminhamento de águas pluviais para as zonas verdes, e campanhas de educação e de informação junto dos consumidores ^[64].

2.2.4. Qualidade do ar interior

A qualidade do ar no interior dos edifícios é, actualmente, um dos factores básicos para o conforto dos seus utilizadores.

Os edifícios, para garantirem a qualidade do ar interior, tornaram-se mais estanques, mais compactos e dependentes de sistemas de ventilação mecânica ou de ar condicionado. Cada vez mais é prática comum a colocação de sistemas de ventilação artificial no interior dos edifícios a nível geral e na maior parte das vezes este é o factor mais importante de contaminação do ar interior. Estes sistemas de ventilação artificial são prejudiciais para a qualidade do ar sobretudo porque acumulam toxinas e, em locais inacessíveis à manutenção, criam condições em que o grau de humidade e temperatura são propícios ao desenvolvimento de fungos, bactérias e de outros microrganismos que ao serem inspirados podem contribuir negativamente para a saúde dos ocupantes ^{[59],[14]}.

Aliando este factor ao aumento de tempo que as pessoas passam no interior das edifícios tem feito com que surjam novas doenças e alergias sobretudo de foro respiratório. Os sintomas que estão associados às condições deficientes da qualidade do ar interior são dores de cabeça, níveis de fadiga pouco usuais, irritação dos olhos ou da pele, congestão nasal, alergias, vias respiratórias secas ou irritadas e náuseas ^[6].

Nos países de clima tropical, as pessoas têm o hábito de dormir com a janela aberta, sempre que possível, durante aproximadamente todo o ano melhorando assim a qualidade do

ar interior. A prática deste hábito é benéfico visto que a qualidade do ar exterior é, em média, 2 a 100 vezes melhor do que a qualidade do ar interior ^[59].

A ventilação nos edifícios é uma característica fundamental para a qualidade do ar interior e faz parte dos hábitos do nosso quotidiano a necessidade de abrir as janelas para proceder à remoção do “ar viciado” substituindo-o por “ar puro”. Este procedimento deve-se às significativas cargas poluentes e as necessidades em oxigénio consequentes das actividades humanas em ambientes fechados: a respiração absorve oxigénio e expelle dióxido de carbono e vapor de água; são expelidos micróbios durante a fala, tosse ou espirros; volatilizam-se odores provenientes da pele, do vestuário, dos locais, materiais e equipamentos, a que estão associados, de uma forma geral, hábitos culturais, alimentares e higiénicos; o ar contaminado com fumos, poeiras e partículas, provenientes do tabaco, etc ^[14].

Para não prejudicar a saúde dos utilizadores dos edifícios é necessário ter algum cuidado na escolha de materiais de construção e utilização de aparelhos de aquecimento por combustão porque em ambos existe poluentes como o amianto, radão (cancro do pulmão), monóxido de carbono (cancro do pulmão) e dióxido de azoto (doenças respiratórias) ^[14].

As exigências de evacuar rapidamente todos os fumos e gases nocivos ou de cheiro incómodo são medidas onde é observável o carácter circunstancial que regula a sua quantificação. Antes da crise petrolífera de 1973, as exigências impunham elevados valores de caudais de renovação de ar e com o aparecimento da crise energética vários países implementaram programas de conservação onde a estanquidade ao ar dos edifícios representava um papel fundamental (com reduções de 10 a 20 vezes conseguia-se obter economias de energia de aquecimento da ordem dos 30% a 50%). Com estas medidas surgiram problemas sérios de poluição interna devidos a usos correntes (respiração, tabaco, lareiras, cozinhas, etc.) e a causas que até à altura não tinham sido sentidas – libertações gasosas ou radioactivas de materiais de construção – com prejuízo sério da saúde. Devido a estes problemas, surgiram nas últimas décadas numerosos trabalhos no sentido de fixar concentrações máximas admissíveis de contaminantes no ar sem prejuízo para a saúde e, a partir daí, fixar os critérios que devem orientar o controle da qualidade do ar ambiente ^[14].

A ventilação natural é uma solução passiva que pode melhorar a qualidade do ar interior e adequar o conforto térmico num dado espaço através de uma boa ventilação natural que possa ser regulada pelo utilizador desse mesmo espaço.

2.2.5. Desconstrução

A desconstrução, enquanto etapa do processo da Construção Sustentável é importante de modo a possibilitar a recuperação de materiais promovendo a sua reutilização e

reciclagem. Este conceito surgiu face ao rápido crescimento da demolição de edifícios e da evolução das preocupações ambientais da população abrindo assim caminho à valorização e reutilização de elementos e materiais de construção que de outra forma seriam tratados como resíduos sem qualquer valor e removidos para locais de depósito por vezes não autorizados para esse fim.

Os resíduos de construção e demolição (RCD), incluem os desperdícios provenientes de remodelações, demolições e obras novas de construção civil. Estes resíduos são, na sua maioria constituídos por materiais como argamassas, restos de tijolo, betão armado, terra, embalagens, latas, madeiras e ainda pequenas quantidades de resíduos perigosos como amianto e resinas ^[51].

O cálculo do custo real de um edifício só será possível quando for considerado no mesmo, por exemplo, taxas sobre os resíduos e emissões produzidas pela sua construção, exploração e demolição. Quando se generalizar a introdução de custos na construção de um edifício, a produção de resíduos poderá ser directamente cobrada (a sua contabilização é relativamente mais simples, do que, por exemplo, a contabilização das emissões de CO₂ produzidas). Em Inglaterra, a gestão de resíduos em estaleiro é uma prioridade e a construção de edifícios com um plano de gestão dos resíduos torna-se mais económica do que sem um plano deste tipo. O conceito de *Zero Waste House*, praticado em Inglaterra, corresponde à produção de habitação apenas com produtos reciclados, sendo os mesmos, acompanhados de guias explicativos dos custos ambientais e da sua aplicação na construção ^[41].

A construção civil é uma actividade com longos séculos de existência. No entanto, apenas nas últimas décadas é que começou a surgir a preocupação com o destino a dar aos resíduos provenientes desta actividade. O sector da construção, de acordo com estimativas comunitárias, gera uma quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) equivalente a 22% do total de resíduos na União Europeia. Actualmente, os dados apontam para 100 milhões de toneladas de RCD produzidos anualmente na União Europeia. A construção deve ser planeada possibilitando reparações e alterações de modo a que, em caso de desmontagem, os materiais possam ser separados e utilizados para outros fins ^[4].

Com base de dados apresentados pela União Europeia, estima-se uma produção de 7,5 milhões de toneladas respeitantes ao ano de 2005. Os RCD contêm percentagens elevadas de materiais, inertes, reutilizáveis e recicláveis, cujos destinos deverão ser potencializados, diminuindo-se, assim, a utilização de recursos naturais e os custos de deposição final em aterro, aumentando-se o seu período de vida útil ^[4].

No seguimento desta preocupação, é urgente não só reavaliar e organizar os métodos de deposição final desses resíduos como promover a análise do seu ciclo de vida, tendo em vista o seu máximo aproveitamento e valorização.

Para responder a esta preocupação verificou-se, em Portugal, a criação de um regime jurídico para o fluxo dos RCD, não obstante o facto de termos assistido, desde logo, a uma maior clarificação de conceitos e definições por via da publicação do actual Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR), o Decreto-lei nº 178/2006, de 5 de Setembro, relativamente ao qual se salienta a criação do quadro legal para o Sistema Integrado de Registo Electrónico de Resíduos (SIRER), permitindo, deste modo aferir a informação relativa a gestão de resíduos, nomeadamente de quantitativos e destinos dos resíduos produzidos a nível nacional ^[4].

Existem vários problemas que são causados pela má gestão dos RCD, entre eles pode-se destacar: o esgotamento prematuro dos aterros, a poluição visual, a proliferação de espécies indesejáveis como ratos, baratas e insectos e o esgotamento prematuro de fontes de matérias-primas não renováveis ^[51].

Para uma melhoria da gestão dos RCD propõem-se as práticas presentes no Quadro 2.2:

Quadro 2.2 - Práticas para a boa gestão de resíduos de construção e demolição. ^[50]

Incentivo à reabilitação de edifícios degradados evitando deste modo a sua demolição
Realização de um planeamento adequado do processo construtivo de novos edifícios para que sejam minimizadas as alterações em obra
Inclusão de elementos pré-fabricados (possíveis de posterior reutilização)
Minimizar o uso de materiais compósitos
Colocação de redes de águas, eléctricas, etc. em ductos ou galerias que possibilitem a sua fácil substituição
Diminuição ao máximo da produção de resíduos perigosos
Contemplação em projecto e posterior instalação de eco pontos
Recolha selectiva dos RCD
Reutilização de materiais
Redução da produção de resíduos - o que passa pelo controlo nas aquisições de materiais
Utilização de acabamentos de reparação simples

Os conceitos de reabilitação e desconstrução associam-se à construção sustentável na gestão de recursos e com o aumento de reabilitações dos edifícios recorre-se, por vezes, à demolição de alguns elementos, criando resíduos que não são aproveitados.

Através da construção sustentável, pretende-se desenvolver um conjunto de soluções construtivas que permitam a aplicação prática da desconstrução viabilizando, desta forma, a construção de edifícios duráveis, adaptáveis, com materiais de menor impacto ambiental e

com grande potencialidade de reutilização. Embora em Portugal, a desconstrução seja ainda reduzida, no contexto europeu é precisamente o contrário, onde os resíduos de construção rondam os 10-20%, os de reabilitação 30-50% e os resíduos de demolição 40-50% ^[19].

Desde os finais dos anos 80 que se efectua uma avaliação de impacto ambiental de uma parte dos empreendimentos de construção onde se procura sistematizar medidas para reduzir os impactes ambientais. A preocupação com a avaliação das características dos produtos e materiais utilizados surge, fazendo com que exista uma atenção ao ciclo de vida dos mesmos de modo a optar-se por uma escolha ambientalmente mais adequada ^[41].

2.3 Parede Trombe

Um dos contributos possíveis de equacionar a nível dos sistemas solares passivos é a aplicação do sistema de parede Trombe enquanto solução adaptável à Construção Sustentável pela sua eficiente gestão dos recursos naturais.

Desde os tempos antigos que o Homem recorre a paredes espessas de adobe ou pedra com o intuito de armazenar o calor proveniente do sol durante o dia, para ser libertado lentamente durante a noite. Actualmente, os edifícios de baixo consumo energético desenvolvem esta técnica antiga incorporando um sistema de armazenamento e libertação de calor conhecido como parede Trombe ^[60].

O conceito do funcionamento da parede Trombe foi desenvolvido em 1881 por Edward Morse e popularizou-se em 1967 pelo Engenheiro francês Félix Trombe e pelo Arquitecto Jacques Michel através da construção da “casa-Trombe” em Odeillo, França sendo actualmente uma solução construtiva muito utilizada nos projectos solares passivos ^[27].

No entanto, ao longo dos anos, a análise deste sistema teve maior relevo nos Estados Unidos da América através de diversos estudos realizados no LASL (*Los Álamos Scientific Laboratory, New Mexico*) por J.Balcomb, McFarland e W.Wray e no NREL (*National Renewable Energy Laboratory, Denver*) por Paul Torcellini e Shanti Pless.

Através de diversas análises experimentais no LASL estudou-se o comportamento de sistemas solares passivos desenvolvendo dois métodos de quantificação dos ganhos energéticos - SLR (*Solar Load Ratio*) ^[40] - e - LCR (*Load Collector Ratio*) ^[65]. O SLR é um método de análise mensal e traduz a relação entre os ganhos e as perdas térmicas e o LCR é um método anual que relaciona as perdas térmicas com a área de pavimento.

O avanço tecnológico permitiu efectuar de análises térmicas a edifícios de uma forma mais rápida e baixos custos desde o desenvolvimento da técnica solar passiva nos Estados Unidos nos anos 70. Os programas de simulação por computador podem desempenhar um

papel fundamental como instrumento de avaliação de projectos de energia solar passiva para edifícios “verdes”. Estes programas permitem que o utilizador introduza alguns parâmetros variáveis para, deste modo, otimizar os projectos. O programa *EnergyPlus* é uma ferramenta útil para realizar análises de comportamento térmico dos edifícios ^[24].

O sistema parede Trombe é integrado na envolvente vertical exterior dos edifícios e é constituída por um envidraçado orientado a Sul. Trata-se de um sistema capaz de absorver a energia solar, armazená-la no interior da parede e libertar o calor para o interior da divisão que se pretende aquecer. A superfície exterior da parede deverá conter uma película selectiva de baixa emissividade ou uma pintura de cor escura para aumentar a absorção da radiação solar incidente na mesma ^[60].

A primeira parede Trombe não ventilada em Portugal foi construída em 1986 na localidade de Vale Rosal na Charneca da Caparica. A parede Trombe utilizada na Casa Vale Rosal (Figura 2.7) situa-se na fachada orientada a Sul da habitação, tem 400mm de espessura, 3,5m² de área e é constituída em betão. O envidraçado simples está separado da face exterior da parede por uma caixa-de-ar de 5cm ^[30]. Na Figura 2.8 ilustra-se o corte da parede Trombe utilizada na Casa Vale Rosal.



Figura 2.7 - Localização da parede Trombe no alçado Sul da Casa Vale Rosal ^[30]

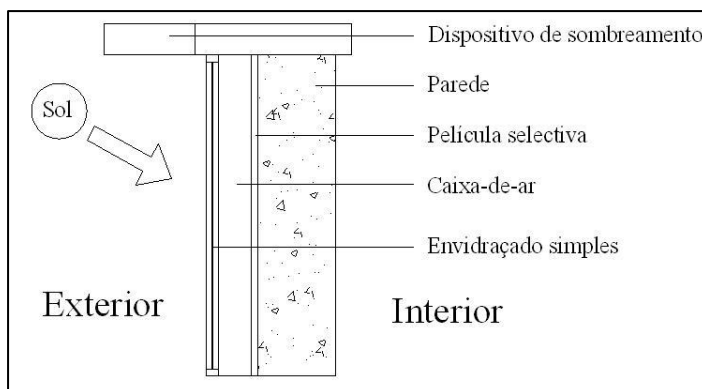


Figura 2.8 - Corte da parede Trombe utilizada na Casa Vale Rosal

Após 1986, construíram-se mais edifícios com o sistema de parede Trombe integrado com o objectivo de melhorar a qualidade de vida dos seus ocupantes em termos de conforto

térmico reduzindo a necessidade de recorrer a equipamentos mecânicos que envolvem consumos de energia. O condomínio Jade em Sintra (Figura 2.9), em 1990, e o edifício de habitação PLEA 88 (Figura 2.10) em Vila do Conde, em 1993, são alguns desses exemplos.



Figura 2.9 - Paredes Trombe numa habitação do Condomínio Jade em Sintra ^[30]



Figura 2.10 - Paredes Trombe no edifício de habitação PLEA 88 em Vila do Conde ^[30]

2.4 Sistemas de Avaliação da Construção Sustentável

No sentido de garantir que os princípios da construção sustentável são alcançados e em simultâneo contribuem para a eficiência energética no desempenho dos próprios edifícios, considerou-se ser importante que se analisasse o potencial dos Sistemas de Certificação voluntária da Construção Sustentável. A Construção Sustentável tem, no seu processo, objectivos de qualidade pelo que adopta para a sua certificação um conjunto de indicadores que enquadram as diferentes dimensões do desenvolvimento sustentável.

A maioria dos sistemas de avaliação ambiental de edifícios baseia-se em indicadores de desempenho que atribuem uma pontuação técnica em função do grau de atendimento a vários requisitos relativos aos aspectos construtivos, climatéricos e ambientais, tendo especial atenção ao interior dos edifícios, à sua envolvente próxima e à sua relação com a cidade e o meio ambiente global ^[16].

No entanto, a utilização de metodologias que avaliassem a sustentabilidade dos edifícios através da análise de todos esses parâmetros constituiria um processo moroso que não promoveria a utilização das mesmas por parte dos responsáveis. Assim, as metodologias existentes abordam a sustentabilidade de uma forma global, baseando a avaliação nos indicadores e parâmetros considerados mais representativos nos objectivos finais da avaliação. Um indicador permite avaliar o comportamento de uma solução face a um ou mais objectivos do desenvolvimento sustentável; e um parâmetro é uma prioridade mensurável ou observável que fornece informação acerca de um fenómeno, ambiente ou área ^[11].

O objectivo da avaliação da sustentabilidade passa pela reunião de dados e informação que irão servir de base aos processos de decisão que decorrem durante as várias fases do ciclo de vida de um edifício. No entanto, na avaliação da sustentabilidade da construção surgem algumas dificuldades que se relacionam com as características particulares desta indústria, nomeadamente: multidisciplinaridade, diferença entre o processo de produção e produto, variação da durabilidade, variação do desempenho dos seus produtos consoante os seus utilizadores, entre outros ^[11].

Devido a estas dificuldades, torna-se complicado expressar a sustentabilidade em termos absolutos, através de um indicador que integre todos os indicadores analisados e que permita a classificação do objecto, relativamente à sua sustentabilidade. No caso de uma solução possuir bom desempenho ambiental mas, ao mesmo tempo, não cumprir as exigências funcionais mínimas, não pode ser considerada sustentável. Por outro lado, uma solução com bom desempenho ambiental que cumpra todas as exigências funcionais, mas que o seu custo de construção ultrapasse largamente o custo da solução construtiva convencional, não poderá ser considerada sustentável pois o seu custo constitui um impedimento à sua implementação ^[12].

A sustentabilidade, é uma questão que deve ser avaliada comparativa e relativamente à prática corrente – a solução de referência – num determinado país/local. Assim, é possível verificar se, ao nível de cada indicador estudado, a solução analisada é melhor ou pior do que a solução de referência e se a solução considerada mais sustentável depende daquilo que o limite tecnológico pode proporcionar em cada momento ^[11].

Os diferentes métodos de avaliação da sustentabilidade de edifícios encontram-se orientados para diferentes escalas de análise: material de construção, produto de construção, elemento de construção, zona independente, edifício e local de implantação. Analisando o objectivo das diferentes metodologias e ferramentas existentes, é possível distinguir-se três tipos ^[11]:

- Ferramentas de suporte à concepção de edifícios sustentáveis (*Performance Based Design*);
- Sistemas de análise do ciclo de vida (LCA) dos produtos e materiais de construção;
- Sistemas e ferramentas de avaliação e reconhecimento da construção sustentável

As ferramentas de suporte utilizadas e úteis para a concepção de edifícios sustentáveis são aplicadas às fases de ante-projecto e projecto dos mesmos, apoiando os diversos decisores na definição do desempenho pretendido para o edifício. Deste modo, os decisores, nomeadamente o dono de obra, descrevem as propriedades que pretendem para a solução final de projecto através de uma hierarquia de requisitos e níveis de desempenho pré estabelecidos que, a serem respeitados pela equipa de projecto, se traduzem no desenvolvimento de um edifício mais sustentável (Figura 2.11). A ferramenta *EcoProp* que foi desenvolvida na Finlândia é um exemplo de uma destas ferramentas ^[11].

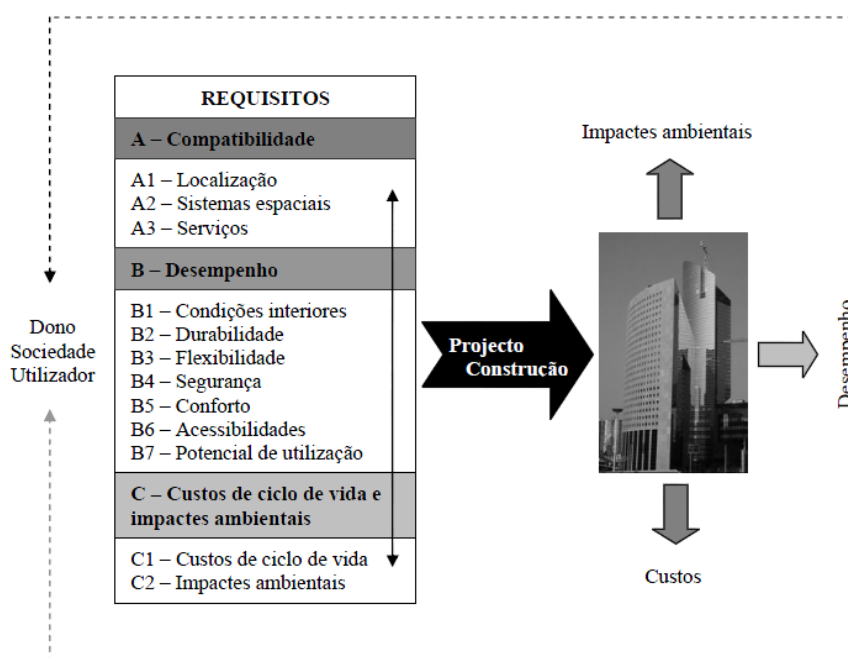


Figura 2.11 - Modelo genérico de uma ferramenta de suporte à concepção de edifícios sustentáveis ^[11]

Os sistemas de análise de ciclo de vida (LCA) aplicam-se, também, às fases de projecto e ante-projecto. Os primeiros sistemas desenvolvidos encontravam-se direccionados para a avaliação do impacte ambiental de materiais e produtos, não só da indústria da construção, como também de outras indústrias. Tendo em conta o panorama actual do sector, os sistemas LCA consideram o desempenho económico como um factor importante no

sucesso comercial de qualquer edifício. Estes sistemas fornecem dados relevantes para a avaliação da sustentabilidade pela razão de realizarem uma avaliação dos impactes ambientais directa e indirectamente associados à totalidade do ciclo de vida dos materiais e produtos utilizados (Figura 2.12) ^[11].

Os sistemas LCA encontram-se implantados por vários países: *Eco-Quantum* (Holanda), *Eco-Effect* (Suécia), *Envest* (Reino Unido), *BEES* (Estados Unidos), *ATTHENA* (Canadá) e *ACV House* (Finlândia).

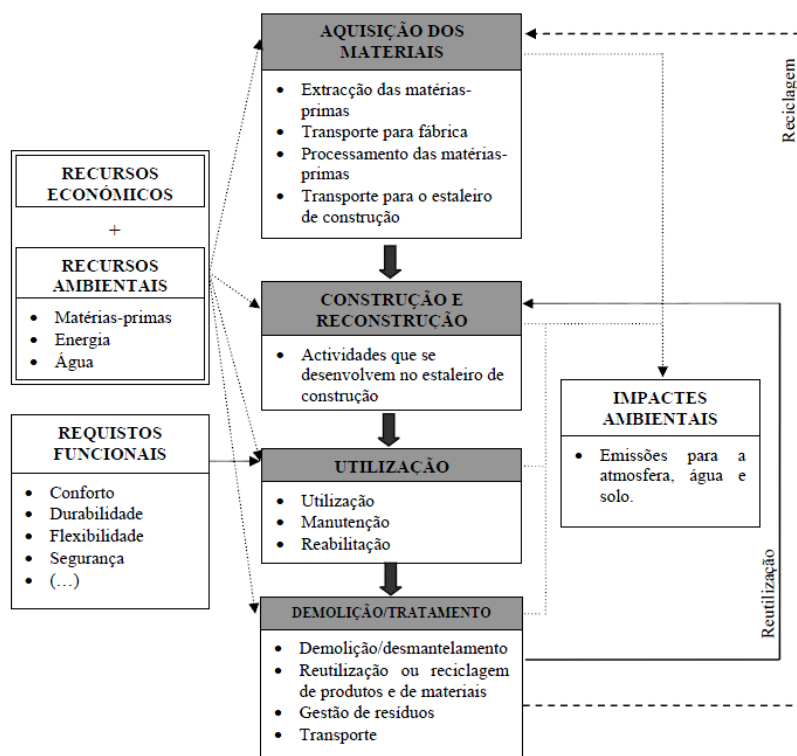


Figura 2.12 - Abordagem integrada ao ciclo de vida de um edifício ^[11]

Os sistemas e ferramentas de avaliação da construção sustentável têm como objectivo principal garantir a sustentabilidade dos edifícios durante a totalidade do seu ciclo de vida: projecto, construção, operação, manutenção, demolição/desconstrução. Analisando todos estes processos, torna-se possível uma melhor integração entre os parâmetros ambientais, sociais, funcionais, económicos e outros critérios convencionais. Para cada tipologia de edifício e para cada fase do ciclo de vida existem métodos específicos ^[11]. Estes métodos e ferramentas referidos anteriormente podem ser utilizados no suporte à concepção de edifícios sustentáveis pois traduzem a sustentabilidade em determinados objectivos por requisito na avaliação do desempenho de uma forma global e de uma forma geral, os sistemas de avaliação da construção sustentável, analisam alguns pontos em comum apesar de existirem diferentes abordagens, nomeadamente: local, água, energia e qualidade do ambiente interior ^[11].

Actualmente, no mercado da construção, existe uma variedade de ferramentas auxiliares que têm sido utilizadas na avaliação da construção sustentável. Existem também ferramentas cuja estrutura é baseada nos sistemas Análise de Ciclo de Vida (LCA) sendo as mais conhecidas: BRREAM (no Reino Unido, em 1990), LEED (nos Estados Unidos). Em Portugal, o sistema que foi adoptado denomina-se LiderA ^[11].

A maior parte destas ferramentas estão desenvolvidas considerando que a soma e combinação do desempenho dos variados materiais adoptados e componentes do edifício resultam no desempenho global do mesmo, mas sempre considerando o edifício no seu todo, incluindo as necessidades energéticas ao longo do ano. Estes sistemas de avaliação de edifícios sustentáveis só podem ter reflexo às escalas local ou regional devido ao facto de se basearem nos regulamentos e legislação local, soluções construtivas convencionais e cada parâmetro e indicador na avaliação é predefinido de acordo com as realidades sociocultural, ambiental e económica do local.

Os sistemas de avaliação de edifícios sustentáveis estão a sofrer constantes evoluções para corrigir algumas limitações e, actualmente, o seu principal objectivo é desenvolver e implementar uma metodologia consensual que sirva de suporte à concepção de edifícios sustentáveis. Pretende-se que seja prática, flexível para que possa ser facilmente adaptadas aos diferentes tipos de edifícios e à constante evolução tecnológica verificada no sector da construção ^[11].

2.4.1 Principais Sistemas de Avaliação da Construção Sustentável

A avaliação ambiental de edifícios aumenta a qualidade quando se começa a gerar um consenso entre investigadores e agências governamentais de que a classificação de desempenho, associada a sistemas de certificação cria mecanismos eficientes de demonstração e melhoria contínua. O mercado da construção é cada vez mais competitivo e a noção de sustentabilidade, técnicas, princípios e formas de avaliação do ambiente tornam-se um importante desafio para os projectistas.

Os sistemas de certificação começaram a surgir na Europa e difundiram-se mais tarde noutros países como Estados Unidos, Canadá (BEPAC). Hoje existem em países como Japão (CASBEE) e Austrália (NABERS) ^[46].

Entre os principais sistemas de certificação energética e ambiental de edificações podem-se destacar em Inglaterra, o BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) e nos Estados Unidos o LEED (*Leadership in Energy & Environmental Design*) ^[58].

Em Portugal foi criado, por Manuel Duarte Pinheiro em 2005, o sistema LiderA (Liderar pelo Ambiente) que se encontra focalizado nos aspectos ambientais a considerar para o bom desempenho do edificado no sentido da sustentabilidade, bem como nos mecanismos que permitem avaliar e certificar esse desempenho ambiental ^[48].

2.4.1.1 BREEAM

O sistema BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) foi desenvolvido, em 1988, no Reino Unido pelo BRE - *Building Research Establishment Ltd* e o sector privado, em parceria com a indústria. Ao longo dos anos, têm vindo a ser criadas diferentes versões aplicáveis a usos que vão desde a habitação até aos escritórios. A avaliação do sistema BREEAM funciona à base da atribuição de créditos ao edifício, sempre que sejam cumpridos determinados requisitos, organizados em categorias ^[46].

Os objectivos principais deste sistema consistem em fornecer orientação sobre meios de minimizar os efeitos adversos dos edifícios nos ambientes local e global, promovendo, ao mesmo tempo um ambiente interno saudável e confortável. Segundo Baldwind em 1998, os objectivos específicos deste método são ^[9]:

- Distinguir edifícios de menor impacte ambiental no mercado;
- Encorajar a utilização de melhores práticas ambientais em todas as fases dos edifícios;
- Definir critérios e padrões para além do imposto na legislação;
- Consciencializar os proprietários, utilizadores, projectistas e operadores quanto aos benefícios de edifícios com menor impacte ambiental.

O sistema BREEAM é actualizado regularmente (3-5 anos) e trata-se da metodologia de maior aceitação internacional tendo sido adaptada para países como Canadá, Hong Kong, Nova Zelândia que agrupa um desempenho de referência (*benchmark*) para o desempenho ambiental e fornece uma gama de benefícios. A popularidade do BREEAM deve-se, em grande parte, à abordagem de *benchmark*; à cobertura abrangente de aspectos relacionados com energia, impacte ambiental, saúde e produtividade, e à identificação de oportunidades realistas para melhoria, assim como de potenciais vantagens financeiras adicionais. A avaliação do BREEAM ocorre de formas distintas ^[6]:

- Para os edifícios novos ou submetidos a reformas e adaptações quanto aos parâmetros “verdes”, além dos critérios de desempenho do edifício, serão consideradas questões referentes a Projecto e Execução;

- Para edifícios existentes e em uso serão considerados os critérios básicos de desempenho, bem como os itens referentes a Operação e Gestão.

O sistema dispõe de guias, nos quais são definidos os critérios e formas de avaliar os edifícios, bem como uma lista de verificação para a sua avaliação, fornecendo um processo formal de avaliação baseado numa auditoria externa. A avaliação do edifício é realizada por avaliadores independentes, treinados e indicados pelo BRE, que por sua vez, é responsável por especificar os critérios e métodos de avaliação e pela garantia da qualidade do processo de avaliação utilizado ^[6].

O sistema BREEAM apresenta-se como um conjunto de instrumentos a serem utilizados por diferentes agentes envolvidos na construção, utilização e gestão dos edifícios, com o objectivo de melhorar o desempenho ambiental do edifício, tendo em conta os benefícios que daí advém. Deste modo, a abordagem geral do BREEAM assenta nas diferentes fases, que seguidamente se mencionam:

- Avaliação inicial;
- Dimensionamento, Inventário e compra de Materiais;
- Gestão e Operação;
- Controlo de Qualidade.

A metodologia utiliza uma lista baseada em questionários e está dividida nas áreas de gestão, saúde e bem-estar, energia, transporte, água, materiais, resíduos, uso e ecologia do solo e poluição. Cada uma destas áreas possui um factor de peso – factor de ponderação – de acordo com a relevância determinada pelo sistema para a tipologia de edifício em causa; sendo atribuída maior importância àquelas que são mais peculiares ao contexto local. Deste modo, se para uma determinada região, o uso de energia for um factor significativo, a ponderação e, portanto, a classificação final, irá considerar esse critério ^[6].

A análise de dados da avaliação deste sistema contém itens com carácter de atendimento obrigatório e outros classificatórios, abordando questões sobre os impactos do edifício no meio ambiente, saúde e conforto do utilizador e gestão de recursos. O cumprimento dos itens obrigatórios e um número mínimo de itens classificatórios irá corresponder à classificação do edifício num dos níveis de desempenho possíveis. De realçar que a pontuação mínima exigida varia de acordo com a versão do método, bem como os níveis de desempenho possíveis e destaca-se, ainda, que a pontuação mínima exigida varia de acordo com a versão do método, bem como os níveis de classificação. Esta avaliação possui

as seguintes categorias: Aprovado, Bom, Muito Bom, Excelente, dependendo da percentagem alcançada em cada critério ^[6].

Este sistema de avaliação já permite avaliar o desempenho ambiental de vários tipos de construção, nomeadamente habitações (*EcoHomes*), edifícios para escritórios (BREEAM Offices), unidades industriais (BREEAM Industrial), tribunais (BREEAM Courts), hospitais (BREEAM Healthcare), escolas (BREEAM Education), prisões (BREEAM Prisons), edifícios comerciais (BREEAM Retail), edifícios multi-residenciais como lares, pensões...- (BREEAM Multi-Residential) e ainda um sistema aberto para outras tipologias (Bespoke BREEAM) ^[6].

2.4.1.2 LEED

Em 1994 surgiu, nos Estados Unidos, um sistema de classificação e desempenho consensual e direccionado para o mercado com o objectivo de acelerar o desenvolvimento e implementação de práticas de projecto e construção ambientalmente responsáveis. Este sistema de classificação foi concebido pelo *United States Green Building Council (USGBC)*, financiado pelo *NIST (National Institute of Standards and Technology)* ^[52].

Naquela época, acreditava-se que os métodos tradicionais de regulamentação ajudavam a melhorar as condições, a eficiência energética e o desempenho ambiental dos edifícios, e que os programas voluntários iriam permitir estimular o mercado para acelerar o alcance das metas estabelecidas ou até ultrapassá-las.

O desenvolvimento e implementação bem sucedidos de sistemas de avaliação de eficiência e desempenho ambiental como BREEAM no Reino Unido ou BEPAC no Canadá, reflectiu no mercado um aumento de consciencialização e do critério de selecção dos consumidores e ainda estimulou os proprietários e construtores a produzirem edifícios ambientalmente avançados. Através do desenvolvimento de sistemas de classificação de desempenho ambiental de edifícios, a indústria da construção foi incentivada a desenvolver produtos e serviços de maior qualidade ambiental.

Estes foram os conceitos onde se baseou o desenvolvimento do sistema LEED (*Leadership in Energy and Environment Design*), um sistema de classificação e certificação ambiental projectado para facilitar a compreensão de conceitos de construção ambientalmente responsável para os profissionais e para a indústria de construção americana. Os trabalhos iniciais ocorreram voltados para os edifícios de ocupação comercial por volta do ano de 1996 ^[6].

O sistema LEED, divide-se em vários tipos de avaliações consoante o tipo de ocupação a que o edifício se destina:

- *LEED Commercial Interiors/Renovations*, direccionado para projectos de renovações e reabilitações de maiores dimensões, não necessariamente em *Green Buildings*.
- *LEED Residential*, virado para o desenvolvimento e construção de residências unifamiliares ou edifícios residenciais até três pisos.

Tal como no sistema BREEAM, este sistema funciona com a atribuição de créditos relacionando-os com créditos pré-definidos, estando previstas revisões regulares ao sistema de certificação a cada 3 a 5 anos. A certificação LEED tem uma validade de 5 anos, sendo depois necessário solicitar uma nova avaliação que se centra, fundamentalmente, na operação e gestão do empreendimento ^[52].

O sistema LEED visa estabelecer um padrão comum de avaliação, para além de promover a integração, sendo um guia para o *design* “verde” e sustentabilidade dos edifícios, estimulando a competição “verde”, divulgando os benefícios dos “*green building*” aos consumidores e transformando a indústria dos edifícios (USGBC, 2003). Com estes conceitos, o LEED pretende promover edifícios ambientalmente responsáveis e lucrativos, bem como lugares saudáveis para viver e trabalhar. O sistema LEED é um sistema influenciado pelo sistema BREEAM, possuindo a estrutura e conceitos idênticos, incorporando aspectos prescritivos e de desempenho, onde também há versões para usos específicos de edifícios. Os aspectos avaliados pelo sistema LEED referem-se ao impacte gerado ao meio ambiente em consequência dos processos relacionados ao edifício como o projecto, construção e operação ^[6].

O método de avaliação consiste na análise da eficiência ambiental potencial do edifício, a partir de uma lista de pré-requisitos (que contém itens obrigatórios e classificatórios, como o BREEAM), atribuindo determinado crédito, baseado numa lista pré-seleccionada de objectivos ^[6].

A contabilização dos pontos é efectuada através da soma simples dos critérios comprovadamente cumpridos, sendo obrigatório o cumprimento dos pré-requisitos. O total de pontos atingidos leva à atribuição de diversos tipos de certificação:

- Certificado – 40 a 49 pontos;
- Certificado prata – 50 a 59 pontos;
- Certificado ouro – 60 a 79 pontos;
- Certificado platina – 80 a 110 pontos.

Estes quatro níveis de certificação de edifícios “verdes” baseiam-se nos pontos obtidos em seis categorias, sendo elas a localização sustentável, a eficiência do uso de água, a energia

e atmosfera, os materiais e recursos, a qualidade ambiental interna e a inovação e processo de *design*. Para cada categoria avaliada é adoptado um pré requisito como parâmetro principal e, assim, definidos os respectivos objectivos (USGBC, 2002) ^[6]:

- Localização Sustentável: controlar a erosão e reduzir os impactes negativos na água e qualidade do ar. Adoptar um plano de controlo da sedimentação e erosão para o terreno do projecto durante a construção;
- Eficiência da Água: Diminuir o consumo de água, desenvolvendo sistemas eficientes de irrigação e re-uso, para além de um programa de reeducação do uso da água;
- Energia e Atmosfera: Verificar e assegurar os elementos essenciais aos edifícios e que os sistemas sejam projectados, instalados e calibrados para operar como objectivado;
- Materiais e Recursos: Facilitar a redução do desperdício gerado pelos ocupantes do edifício;
- Qualidade Ambiental Interna: Estabelecer um desempenho mínimo da qualidade do ar interior, para prevenir o desenvolvimento dos problemas em edificações provenientes da qualidade ambiental interna, mantendo a saúde e bem-estar dos ocupantes;
- Inovação e Processo de *Design*: A utilização dos critérios mencionados em cima não deve constituir um empecilho à criação do projectista;
- Prioridade Regional: Determina as diferentes prioridades ambientais entre diferentes regiões;

Cada uma destas sete áreas de avaliação integra um conjunto de pontos, que perfazem um total de 110 pontos aos quais é atribuída uma classificação, à semelhança das versões anteriores deste sistema ^[52].

A mais-valia deste método é a sua estrutura simples, compreensível e facilmente ajustável. Porém, a não ponderação dos pontos, faz com que um edifício que tenha obtido boa pontuação em determinada categoria e atingido o mínimo de desempenho permitido em outra, possa obter uma boa classificação final, reflectindo apenas o desempenho geral do edifício.

A certificação obtida por este método é válida por um período de cinco anos e acabando o prazo, deverá ser encaminhada uma nova solicitação por um programa apropriado do USGBC, mas desta vez centrado na avaliação da operação e gestão do empreendimento. Após Janeiro de 2002 foram previstas revisões regulares do sistema de certificação a cada 3

ou 5 anos ou num período inferior, caso uma decisão consensual do USGBC, ou alguma regulamentação local, assim o exigir ^[6].

Este sistema, não sendo o único existente, é o sistema mais difundido e utilizado nos Estados Unidos, estando em franca aplicação a diferentes tipos de empreendimentos, quer no sector público, quer no sector privado. Provavelmente é o método disponível mais amigável enquanto ferramenta de projecto, o que facilita a sua incorporação à prática profissional. O sistema LEED através da sua estrutura simples e, por isso, criticada, baseia-se na especificação de desempenho em vez de critérios prescritivos, tomando por referência princípios ambientais e de uso de energia consolidados em normas e recomendações de organismos com credibilidade reconhecida. Estas práticas de efectividade são, deste modo, equilibradas com princípios emergentes, de forma a estimular a adopção de tecnologias e conceitos inovadores. Trata-se de um sistema baseado num programa voluntário que pretende avaliar o desempenho ambiental de um edifício como um todo e considerando o ciclo de vida do mesmo ^[46].

2.4.1.3 LiderA

O sistema de avaliação ambiental utilizado em Portugal é o LiderA, tendo a sua primeira versão sido desenvolvida no ano de 2005. Trata-se de um sistema que incidia preferencialmente no edificado e à sua respectiva envolvente sendo uma marca registada no nosso país e fornecendo-lhe, deste modo, autonomia para reconhecer ou certificar planos e projectos de diferentes finalidades.

O sistema LiderA, acrónimo de Liderar pelo Ambiente para a construção sustentável, é a designação de um sistema de avaliação e reconhecimento voluntário da construção sustentável e do ambiente construído ^[48].

Este sistema destina-se: - a apoiar o desenvolvimento de planos e projectos que procurem a sustentabilidade; - a avaliar e posicionar o seu desempenho na fase de concepção, obra e operação, quanto à procura da sustentabilidade; - a suportar a gestão na fase de construção e operação; - a atribuir a certificação por marca registada, através de verificação por uma avaliação independente; - a servir como instrumento de mercado distintivo para os empreendimentos e clientes que valorizem a sustentabilidade ^[6].

O LiderA é um sistema de certificação ambiental adaptado ao contexto climático, económico e sócio-cultural de Portugal e baseia-se num conjunto de critérios que permitem comparar níveis de desempenho ambiental da construção num ponto de vista de sustentabilidade.

Os diferentes valores de desempenho (limiares) decorrem do nível atingido e do tipo de uso. O sistema classifica o desempenho de A a G, sendo que o nível E representa a prática actual e o nível A, em muitos critérios, corresponde a um desempenho cerca de 50% superior ao nível E. Embora seja um sistema voluntário, cada projecto deve respeitar um conjunto de pré-requisitos ^[6].

A certificação segundo este sistema, tem a função de apoiar os promotores, projectistas, construtores e gestores na implementação das soluções de melhor desempenho ambiental e na obtenção das evidências que, após validação pela equipa de verificadores do LiderA, atribuem a certificação a empreendimentos construídos utilizando o sistema LiderA, sempre que obtenham valores de desempenho nos critérios superiores ao nível C (ou seja, B,A,A+ ou A++) ^[6].

O LiderA evidencia os aspectos ambientais a considerar para o bom desempenho do edificado no sentido da sustentabilidade, bem como os mecanismos que permitem avaliar, reconhecer e certificar este desempenho ambiental. Assim sendo, dispõe de três níveis: princípios orientadores (estratégico - da ideia ao plano); requisitos para a sustentabilidade (táctico) e a aplicação operacional e gestão no ciclo de vida, tendo em vista permitir o acompanhamento e a avaliação nas diferentes fases de desenvolvimento do ciclo de vida do empreendimento ^[6].

A nível estratégico, são evidenciados os princípios da abordagem que devem ser definidos numa lógica de Política Ambiental. Como referências de comparação neste nível, foram tidas em consideração a Agenda 21 e as orientações de sustentabilidade, presentes no regulamento geral das edificações, traduzidos em princípios. Estes princípios, estabelecidos ao nível da política do empreendimento, aplicam-se desde a fase inicial da concepção e entendem o desempenho como um compromisso para os atingir; compromisso que deve ser formalizado para poder fazer parte dos empreendimentos como uma estratégia de sustentabilidade. Deste modo, este sistema assenta em seis princípios:

- Princípio 1 - Valorizar a dinâmica local e promover uma adequada integração;
- Princípio 2 - Fomentar a eficiência no uso dos recursos;
- Princípio 3 - Reduzir o impacte das cargas (quer em valor, quer em toxicidade)
- Princípio 4 - Assegurar a qualidade do ambiente interior, focada no conforto ambiental;
- Princípio 5 - Fomentar as vivências sócio-económicas sustentáveis;

- Princípio 6 - Assegurar a melhor utilização sustentável dos ambientes construídos, através da gestão ambiental e da inovação.

Este conjunto de 6 princípios de bom desempenho ambiental (local e integração, recursos, cargas, ambiente interior, durabilidade e acessibilidade), é traduzido para 22 áreas e 50 critérios, nos quais se avalia o edificado em função do seu desempenho no caminho para a sustentabilidade ^[6]. As áreas deste sistema são as seguintes:

- Integração local, no que diz respeito ao solo, aos Ecossistemas naturais e Paisagem e ao Património;
- Recursos, abrangendo a Energia, a Água, os Materiais e os recursos Alimentares;
- Cargas Ambientais, envolvendo os Efluentes, as Emissões Atmosféricas, os Resíduos, o Ruído Exterior e a Poluição Ilumino-térmica;
- Conforto Ambiental, nas áreas da Qualidade do Ar, do Conforto Térmico e da Iluminação e Acústica;
- Vivência sócio-económica, que integra o Acesso para todos, os Custos no ciclo de vida, a Diversidade Económica, as Amenidades e a Interação Social e Participação e Controlo;
- Gestão Ambiental e Inovação.

Para obter um valor agregado, a classificação final conjugada é obtida através da ponderação destas vinte e duas áreas. Para o efeito, obtiveram-se as ponderações para cada uma das áreas, sendo a área de maior importância a energia (peso 17%), seguida da água (8%) e do solo (7%). A contabilização por vertentes posiciona como mais relevantes os recursos com 32% do peso, seguido da vivência sócio-económica (19%), conforto ambiental (15%), integração local (14%), cargas ambientais (12%) e por fim a gestão ambiental (8%) ^[6].

A primeira versão V1.02 (disponibilizada em 2005) destinava-se ao edificado e ao respectivo espaço envolvente. Porém, face às aplicações efectuadas, foi desenvolvida uma versão 2.0 que alarga a possibilidade de aplicação do sistema, não apenas ao edificado mas igualmente ao ambiente construído, incluindo a procura de edifícios, espaços exteriores, quarteirões, bairros e empreendimentos de várias escalas ^[6].

3 Conservação de energia

3.1 Energia Solar e os edifícios

Sendo o Sol a nossa principal fonte de energia responsável pela manutenção das várias formas de vida existentes na Terra pode ser considerado como um recurso praticamente inesgotável e constante, quando comparado com a história da existência por parte do Homem neste planeta.

No centro do Sol, mais propriamente numa região denominada fotosfera solar (camada com aproximadamente 300 km de espessura e temperatura superficial na ordem dos 5800°K), a energia resultante das reacções de fusão dos núcleos dos átomos de hidrogénio, originando núcleos de hélio, é radiada para o espaço sobre a forma de energia electromagnética, a uma velocidade próxima de 300.000 km/seg. Esta energia, ao atingir a atmosfera terrestre pode ser absorvida ou reflectida pelos seus diferentes componentes. Dados recentes da WMO (World Meteorological Organization) indicam que a radiação solar incidente sobre uma superfície perpendicular ao eixo Terra-Sol, situada no topo da atmosfera, é de 1367 W/m² [22].

Esta radiação que atinge o solo é constituída por três componentes: radiação directa, radiação difusa e radiação reflectida. O Sol, devido à radiação por ele transmitida, trata-se de um elemento de elevadíssima importância no estudo da eficiência energética dos edifícios, tanto como fonte de calor como fonte de luz.

Existem variáveis climáticas que influenciam os edifícios em termos de transferência de calor, sendo as mais importantes a temperatura do ar exterior e a radiação solar. A temperatura do ar determina o estabelecimento de fluxos energéticos do interior para o exterior, fluxos estes que ocorrem fundamentalmente na estação do Inverno, tratando-se neste caso de perdas térmicas, enquanto que na estação do Verão o sentido do fluxo tem tendência a inverter-se, passando para uma situação de ganhos térmicos. No caso da estação de Inverno, estamos perante as perdas térmicas e estas constituem a razão principal para a diminuição da temperatura interior num edifício e um dos principais aspectos a ter em conta na fase do projecto. Na situação da estação de Verão, estamos perante uma situação de ganhos térmicos, ou seja, o fluxo de transferência de calor tem o sentido exterior – interior contribuindo, deste modo, para o aumento da carga térmica do edifício e consequentemente aumento da sua temperatura interna [29].

Relativamente à outra variável climática que influencia os edifícios em termos de transferência de calor é a radiação solar. Trata-se de uma variável que possui um papel fundamental no conforto térmico em qualquer edifício, sendo que na estação de Inverno é

uma fonte de calor importante e na estação de Verão é uma fonte de calor a evitar, para não ocorrer um aumento da temperatura interior nos edifícios ^[29].

Torna-se necessário compreender a interacção do sol, como fonte de calor, com os edifícios quer em termos energéticos, assim como em termos da sua posição ao longo de todo o ano para, deste modo, melhor projectar edifícios na perspectiva da conservação de energia.

3.2 Geometria solar

No movimento de translação, a Terra percorre uma trajectória elíptica num plano inclinado de $23,27^\circ$ relativamente ao plano do equador. Este ângulo define a posição dos trópicos e faz com que os dois hemisférios terrestres recebam quantidades distintas de radiação solar ao longo do ano, caracterizando as estações pelos solstícios de Verão e de Inverno e pelos equinócios de Primavera e de Outono (Figura 3.1) ^[36].

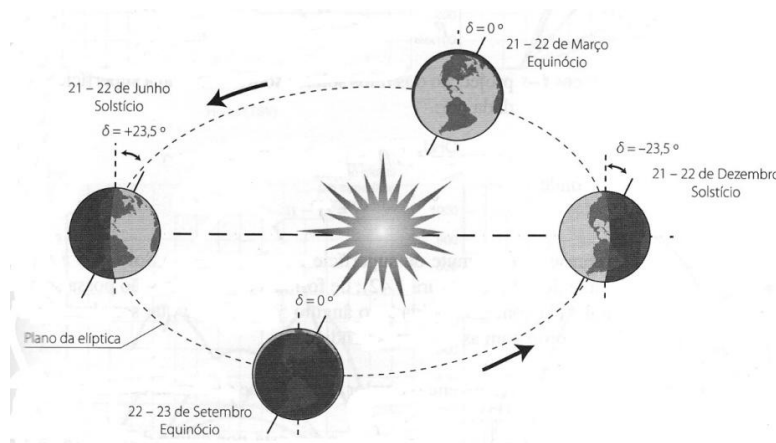


Figura 3.1 – Movimento de translação da Terra

A posição do Sol na abóbada celeste pode ser definida através dos ângulos de altitude solar (γ) e de azimuth solar (α), ângulos que variam de acordo com a hora do dia e período do ano (Figura 3.2).

A radiação solar pode ser dividida em directa, difusa e reflectida. Esta situação é explicada porque depois de a radiação penetrar a atmosfera começa a sofrer interferências no seu trajecto em direcção à superfície terrestre ^[36]. A parcela que atinge directamente a Terra chama-se radiação directa e a sua intensidade depende da altitude solar (γ) e do ângulo de incidência dos raios solares relativamente à superfície receptora (θ).

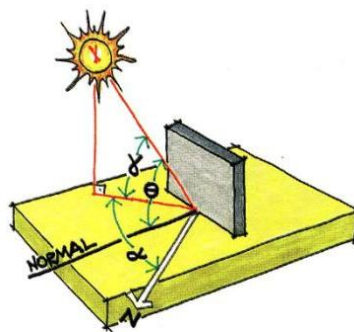


Figura 3.2 – Ângulos de altitude solar (γ), azimute solar (α) e incidência (θ) ^[36]

A quantidade de radiação solar que atinge a superfície terrestre depende, basicamente, de três factores: a lei do cosseno, dissipação atmosférica e a duração da luz do dia. A lei do cosseno (Figura 3.3) estabelece que a intensidade de radiação incidente numa superfície inclinada é igual à razão entre a intensidade normal e o cosseno do ângulo de incidência ^[36].

$$\cos \beta = \frac{B}{C} \quad (1)$$

Área C > Área B

Intensidade Solar C < Intensidade Solar B

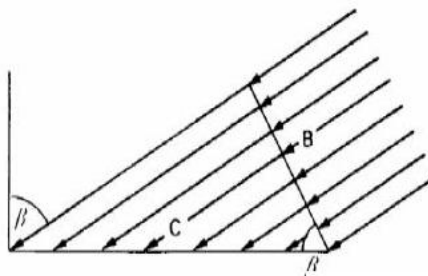


Figura 3.3 – Lei do cosseno

Quanto menor for a altitude solar, mais longo é o trajecto da radiação através da atmosfera e, conseqüentemente, chega menos radiação à superfície terrestre. A este fenómeno dá-se o nome de dissipação atmosférica, ou seja, a radiação solar é absorvida pelo ozono, vapores e partículas presentes na atmosfera. A radiação difusa é a luz solar recebida indirectamente, resultante da acção da difracção nas nuvens, nevoeiro, poeiras em suspensão e outros obstáculos na atmosfera. A radiação reflectida é proveniente da reflexão no solo e objectos circundantes ^{[22], [36]}.

Sendo o Sol a maior fonte de energia utilizada na arquitectura bioclimática torna-se importante conhecer os diferentes percursos do sol ao longo do dia nas diferentes estações do ano no sentido de:

- Aproveitar da melhor forma os ganhos solares e assim dimensionar correctamente os sistemas solares (p.e. paredes Trombe) no que respeita à sua localização e dimensões;
- Restringir a sua entrada nos casos em que o mesmo efeito se demonstra inconveniente.

Através da trajectória solar obtêm-se a duração da exposição solar e o ângulo de incidência dos raios solares que determinam a intensidade da radiação.

Na Figura 3.4 observa-se a diferença de trajectória do sol no Verão e no Inverno.

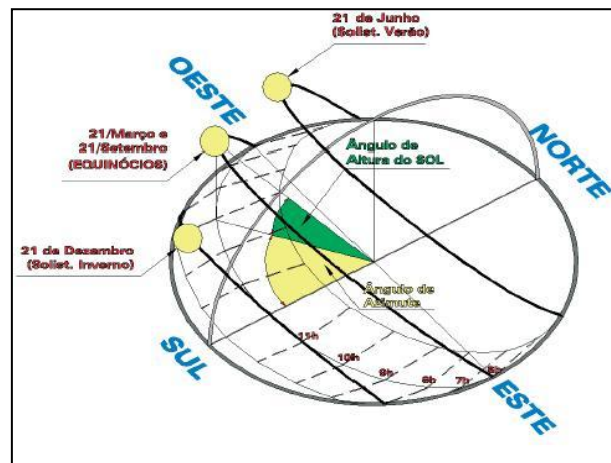


Figura 3.4 - Percurso do sol durante o dia ao longo do ano ^[29]

Em Portugal, no solstício de Inverno (21 de Dezembro), o Sol nasce relativamente próximo da orientação Sudeste e põe-se relativamente próximo da orientação Sudoeste. Neste dia, o ângulo de altura do Sol apresenta os valores mais baixos de todo o ano ^[29].

Nos Equinócios (21 de Março e 21 de Setembro) o Sol nasce exactamente na orientação Este e põe-se exactamente na orientação Oeste. No solstício de Verão (21 de Junho) o sol nasce relativamente próximo da orientação Nordeste e põe-se relativamente próximo da orientação Noroeste, variando o ângulo de azimute do nascer e do pôr-do-Sol com a latitude do lugar. É neste dia que o ângulo de altura do Sol apresenta os valores mais altos de todo o ano ^[29].

No estudo da geometria solar incluem-se os efeitos de palas e sombreamentos dos edifícios e na Figura 3.5 observa-se a diferença do ângulo de incidência do sol na estação de Verão e Inverno, permitindo assim, um aproveitamento da energia solar diferenciado consoante as estações do ano.

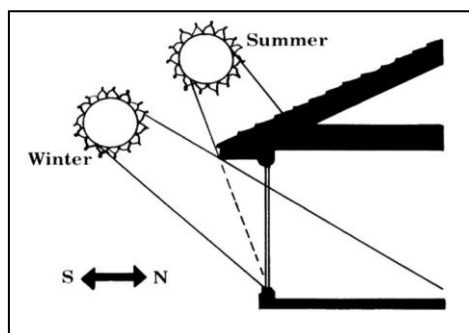


Figura 3.5 - Diferente posição do sol nas estações de Verão e Inverno

3.2.1 Orientação das fachadas envidraçadas e protecção solar

A trajectória do Sol ao longo do ano possui uma grande importância no que respeita à definição da localização das fachadas envidraçadas, à sua dimensão e ao tipo de vidro a escolher na fase de concepção de projecto.

Verifica-se que uma fachada envidraçada orientada a Sul, em termos anuais, recebe um maior nível de radiação solar do que as fachadas com outras orientações e no Verão é uma fachada que se consegue proteger dessa mesma radiação com menor dificuldade devido à trajectória do Sol ^[29].

Na estação de Inverno, surge a necessidade de aquecer os edifícios e a estratégia correcta a utilizar será a de captar a radiação solar disponível. A orientação Sul é aquela que propicia maiores ganhos solares sendo que, o percurso do Sol no Inverno é vantajoso, uma vez que o seu percurso se efectua para azimutes muito próximos de Sul geográfico. No Verão, é necessário minimizar os ganhos solares e colocando palas de sombreamento sobre o vidro no caso de uma fachada orientada a Sul esse objectivo é conseguido ^[29].

Na Figura 3.6 é possível observar, através da trajectória do Sol, que durante o período da manhã e princípio da tarde, os envidraçados verticais de uma fachada orientada a sul possibilitam uma maior entrada de radiação para a habitação ^[29].

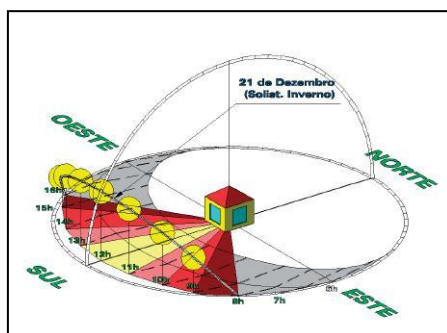


Figura 3.6 - Percurso do Sol entre as 8h e 16h na estação de Inverno ^[29]

No Verão torna-se necessário minimizar os ganhos solares de radiação. A incidência em envidraçados verticais orientados a Sul é realizada com grandes ângulos, reduzindo os ganhos solares. Neste caso, a colocação de palas de sombreamento atenua a incidência de radiação directa. Na Figura 3.7 observa-se o percurso do Sol no Verão entre as 10h e as 14h ^[29].

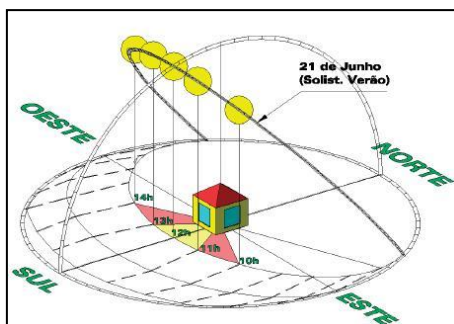


Figura 3.7 - Percurso do Sol no Verão entre as 10h e as 14h ^[29]

Na Figura 3.8 apresentam-se valores da radiação solar ao longo do ano na cidade de Lisboa e comprova-se que a orientação Sul é a orientação que fornece um maior contributo de energia solar.

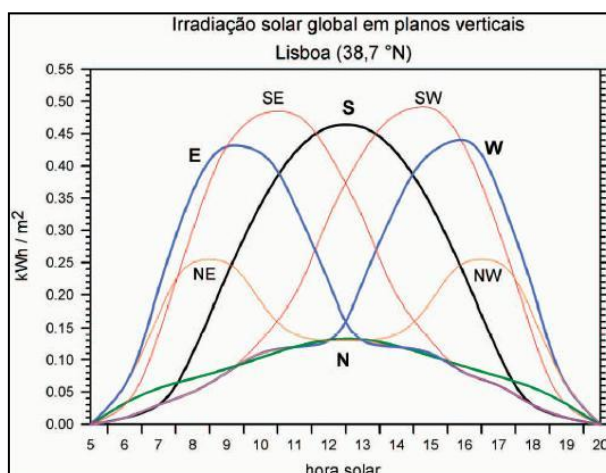


Figura 3.8 - Radiação solar ao longo do ano (por orientações) ^[29]

Nos períodos de temperaturas mais elevadas, a protecção da radiação solar directa, é um factor importante para um bom comportamento térmico dos edifícios. O balanço energético dos edifícios está directamente relacionado com: a orientação e posicionamento dos vãos envidraçados; o tipo de envidraçado e o sistema de sombreamento.

Deverão ser introduzidos elementos de sombreamento fixos e/ou móveis que sejam adequados para o envidraçado, que possuam bom desempenho energético e que contribuam para o conforto térmico no interior da habitação. Os sistemas fixos são menos versáteis do que os móveis e devem ser concebidos para os períodos quentes e frios, tirando partido da radiação solar.

Os sistemas de sombreamento móveis possuem duas formas de serem introduzidos: no interior ou no exterior dos edifícios. Estes sistemas têm como principal função a protecção da radiação solar mas funcionam, também, como elementos de isolamento térmico devido à caixa-de-ar formada entre estes e o envidraçado (Figura 3.9).

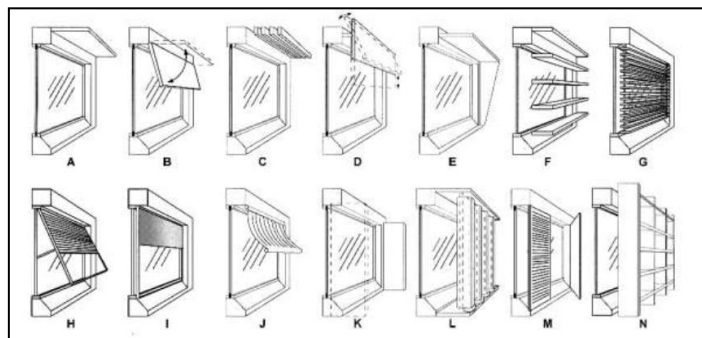


Figura 3.9 - Exemplos de sistemas de protecção solar exteriores de janelas ^[54]

O sombreamento dos edifícios pode ser conseguido a partir dos elementos arquitectónicos e através da vegetação circundante ao edifício. As árvores propiciam a sombra desejada e a protecção da radiação solar directa. Caso sejam utilizadas árvores de folha caduca, durante o período de Inverno é possível tirar partido da radiação solar directa para o aquecimento.

As construções vizinhas devem ser consideradas para o contexto da radiação solar, sendo nas zonas urbanas que os projectistas se deparam com as maiores condicionantes e desafios.

3.3 Parâmetros térmicos associados aos edifícios

As trocas de calor nos edifícios ocorrem essencialmente através da envolvente exterior e de seguida apresentam-se os conceitos fundamentais relacionados com a transmissão de calor e o conforto térmico em edifícios.

3.3.1 Fenómenos de transmissão de calor

Os edifícios devem garantir um ambiente com as condições mínimas de conforto e habitabilidade no seu interior. Os elementos que separam o interior do exterior dos edifícios – paredes, pavimentos, janelas, entre outros - desempenham um papel fundamental na procura do conforto no seu interior.

A transmissão do calor a partir da envolvente exterior dos edifícios pode ocorrer segundo três mecanismos distintos (Figura 3.10): condução, radiação e convecção. Estes

mecanismos de transmissão de calor também ocorrem, no caso da parede Trombe, enquanto sistema integrado na envolvente vertical exterior dos edifícios, sendo fundamentais para o desempenho do sistema.

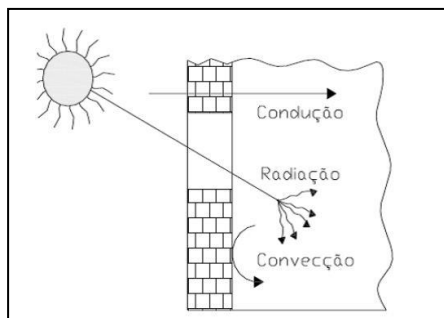


Figura 3.10 – Mecanismos de transmissão de calor em edifícios ^[63]

A Figura 3.11 ilustra os processos de transferência de calor existentes nos edifícios e as zonas onde ocorrem.

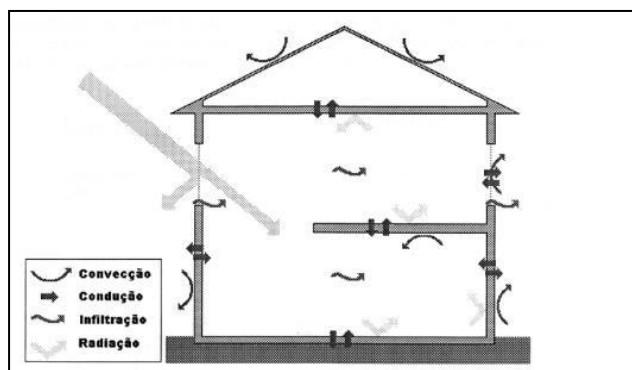


Figura 3.11 - Processos térmicos num edifício ^[31]

3.3.2 Transmissão de calor por condução

A transmissão de calor por condução dá-se de um ponto do corpo para outro, ou de um corpo para outro em contacto com ele, sem que se verifiquem movimentos internos ou emissões de radiações ^[15]. A condução corresponde a um fenómeno de transferência de calor entre duas zonas, por contacto directo, com temperaturas diferentes podendo ocorrer em sólidos ou em fluidos ^[33].

Através da massa de um material homogéneo, sólido ou fluido, que tenha uma temperatura diferente em duas zonas separadas, irá ocorrer transferência de calor por condução, que pode ser quantificada pela quantidade de calor Q (W) que, ao ser dividida pela área perpendicular à direcção de propagação A (m²) resulta o fluxo de calor q .

$$q = \frac{Q}{A} \text{ (W / m}^2\text{)} \quad (2)$$

Nos edifícios, o processo de transmissão de calor mais significativo é a condução e depende da condutibilidade térmica³ dos materiais (λ) e da espessura da parede do elemento da envolvente (e), como se pode verificar na Lei de Fourier para a condução ^[15]:

$$Q_{condução} = - \lambda . A \cdot \frac{dT}{de} \quad (3)$$

Sendo:

$Q_{condução}$ - a quantidade de calor transferido por condução (W)

λ - condutibilidade térmica do elemento (W/m.°C)

A - área da superfície (m²)

dT/de - gradiente de temperatura (°C/m).

O sinal menos presente na expressão (3) decorre do facto de as transferências de calor ocorrerem das temperaturas mais elevadas para as mais baixas ^[33]. Na Lei de Fourier, estão admitidas as hipóteses de homogeneidade e isotropia do material relativamente à condutibilidade térmica ^[15].

A condutibilidade térmica é uma característica própria de cada material que traduz a forma como o material se deixa atravessar pelo calor, podendo ser definida como a quantidade de calor que atravessa a unidade de espessura do material, por unidade de área, por unidade de diferença de temperatura. Assim, um material bom isolante térmico é aquele que tem um valor muito reduzido de condutibilidade térmica, como por exemplo os poliestirenos que atingem valores na ordem de 0,004. Os materiais maus isolantes térmicos, ao contrário dos materiais referenciados anteriormente têm valores de condutibilidade bastante acima da unidade ^[33].

3.3.3 Transmissão de calor por convecção

A convecção pode ser compreendida como uma forma específica de condução, em que a variação de temperatura das moléculas implica a alteração relativa do seu posicionamento e, consequentemente, variações de massa volúmica, das quais resultam movimentos típicos da convecção. A convecção é um mecanismo de transferência de calor típico dos fluidos, visto que pressupõe a existência de movimentos que são incompatíveis com corpos sólidos ^[33].

³ Condutibilidade térmica (λ) é uma propriedade térmica típica de um material homogéneo que é igual à quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma camada de espessura e e de área unitária desse material por unidade de diferença de temperatura entre as suas duas faces. Assim, a condutibilidade térmica caracteriza a maior ou menor facilidade de transferência de calor ^[21].

A convecção tem base na transferência de energia por movimento dos fluidos, líquidos ou gasosos e condução molecular e pode ocorrer de duas formas:

- Natural
- Forçada

O processo natural ocorre se o movimento resultar das forças de impulsão, existentes devido às diferenças de densidade e o processo de convecção forçada ocorre no caso de existir algo a forçar o movimento do ar (vento ou equipamentos mecânicos), ou seja, as moléculas de ar quente que estão junto da superfície vão ser substituídas, mais rapidamente, por outras frias que vão absorver o calor da superfície, aquecer e dar lugar a outras moléculas frias novamente. Na Figura 3.12 observa-se o mecanismo de transferência de calor por convecção numa habitação.



Figura 3.12 – Mecanismo de transferência de calor por convecção ^[3]

A Lei do Arrefecimento, formulada por Newton permite determinar o fluxo de calor, por convecção, entre uma superfície sólida e um fluido. Particularizando para o caso de um edifício, define-se a superfície sólida como a envolvente e o fluido o ar que se encontra em contacto com a própria.

A Lei do Arrefecimento (Q_{conve}) é dada pela seguinte expressão:

$$Q_{convecção} = h_c \cdot A_s (T - T_{\infty}) \quad (W / m^2) \quad (4)$$

Em que:

$Q_{convecção}$ - quantidade de calor transmitida (W)

h_c - condutância térmica superficial por convecção ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A_s - área superficial de contacto entre o elemento sólido e o fluido (m^2)

T_s - temperatura superficial do sólido ($^\circ C$)

T_{∞} - temperatura do fluido ($^\circ C$)

3.3.4 Transmissão de calor por radiação

Todos os corpos emitem - e, de uma forma semelhante, absorvem - radiações electromagnéticas de diversos comprimentos de onda com uma intensidade que é função da temperatura absoluta a que se encontram e do estado da sua superfície. A esta forma de transmissão de calor é designado por radiação térmica. O mecanismo de transmissão de calor por radiação pode ser considerado como um transporte de energia por fotões emitidos pela excitação de moléculas ou átomos do material ou, alternativamente, pode ser assimilado a um transporte de energia por ondas electromagnéticas. A radiação térmica compreende apenas os valores correspondentes ao intervalo 10^{-7} metro/ 10^{-4} metro e na generalidade dos processos que ocorrem na prática aqueles valores situam-se entre 0,3 e 10 μm (unidade de comprimento de onda) ^[15].

Para se compreender melhor o fenómeno da radiação, é importante ter conhecimento sobre o conceito de corpo negro. Stefan e Boltzman demonstraram que a energia total emitida por um corpo radiante puro - que toma a designação de corpo negro e que se caracteriza, por um lado, por absorver toda a radiação nela incidente, e por outro, por radiar com intensidade igual em todas as direcções (emissão difusa). Esta energia em questão corresponde ao máximo de energia que pode ser emitida e que é dada pela seguinte expressão ^[33]:

$$Q_{\max} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (\text{W}) \quad (5)$$

Em que:

σ - constante de Stefan-Boltzmann que toma o valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

T - temperatura absoluta (K)

A - área (m^2)

Este valor máximo é relativo à energia emitida por uma abstracção física designada por *corpo negro*. A relação entre a energia realmente emitida por uma superfície e o valor máximo correspondente à emissão do corpo negro é designada por emissividade (ϵ). A gama de valores da emissividade vai de 0 até 1, dependendo da capacidade do corpo de emitir ou não toda a energia. Um corpo que possua uma emissividade de valor 1 é designado de *corpo negro* (ideal), ou seja, neste corpo não se verificam reflexões pelo o que toda a energia incidente é absorvida e posteriormente emitida. No entanto, um corpo com emissividade 0 significa que toda a energia incidente é reflectida. De uma forma geral, os materiais de

construção apresentam valores de emissividade no ordem de 0,8. A expressão da energia emitida por um corpo real é a seguinte ^{[15], [33]}:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (\text{W}) \quad (6)$$

Sempre que um corpo real recebe energia radiante (radiação incidente, q_i), dá-se geralmente (Figura 3.13):

- absorção de parte dessa energia (radiação absorvida, q_a)
- reflexão de outra parte (radiação reflectida, q_r)
- transmissão da parte restante (radiação transmitida, q_t).

Designam-se por coeficientes de absorção α (ou absorptividade), reflexão ρ (ou reflectividade) e transmissão (ou transmissividade) τ , as quantidades percentuais de energia incidente absorvida, reflectida e transmitida:

$$\alpha = \frac{q_a}{q_i}, \rho = \frac{q_r}{q_i}, \tau = \frac{q_t}{q_i} \quad (7)$$

Pela conservação de energia, a soma destes três coeficientes tem de ser igual a 1. Quando os corpos são opacos, não há radiação transmitida ($\tau = 0$) pelo o que a relação dos coeficientes é simplificada para ^[15]:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (8)$$

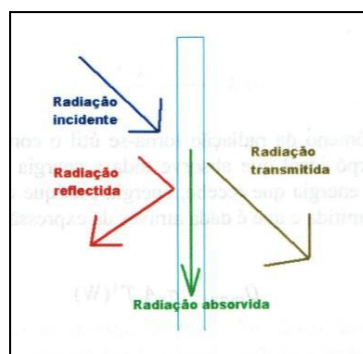


Figura 3.13 - Subdivisão da radiação incidente numa superfície transparente ^[27]

De uma forma geral, os valores de α e ρ dependem da temperatura do corpo e diferem ainda para radiações com diferentes comprimento de onda e ângulo de incidência. Na Figura

3.14 apresentam-se os valores da reflectividade (ρ) de algumas superfícies em função do comprimento de onda da radiação ^[15].

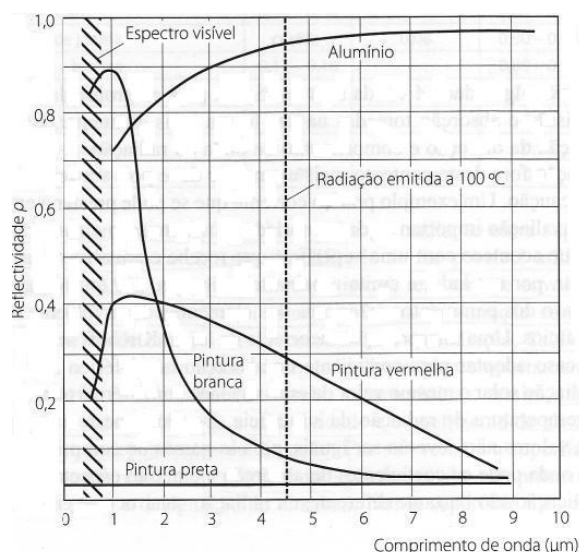


Figura 3.14 – Coeficiente de reflexão em função do comprimento de onda ^[15]

Através da Figura 3.14, entende-se a importância de aplicar uma pintura de cor preta na superfície exterior da parede Trombe para diminuir a reflectividade e aumentar a absortividade. O aumento da absortividade ocorre devido à radiação transmitida ser nula no caso da parede Trombe (elemento opaco).

3.3.5 Inércia térmica

A inércia térmica é um parâmetro muito importante para o balanço térmico de um edifício e relaciona-se com a capacidade que um elemento possui de armazenar calor e só libertá-lo ao fim de um certo tempo. A inércia térmica pode ser utilizada para absorver energia proveniente dos ganhos solares durante o dia e libertá-los à noite reduzindo, deste modo, a carga de aquecimento de um edifício. Esta capacidade depende de algumas características como a massa dos elementos de construção, do calor específico e também da sua condutibilidade térmica ^[15]. O fenómeno de absorção de energia proveniente dos ganhos solares durante o dia e libertá-los à noite ocorre no sistema de parede Trombe visto que a parede em questão é de elevada inércia térmica.

Na Figura 3.15 observa-se a sequência dos perfis de temperatura de uma parede de elevada inércia térmica de um edifício ao longo de um dia num clima temperado com uma amplitude térmica diária considerável. No início do dia, através da acção combinada da temperatura e da radiação solar, o paramento exterior sofre uma subida de temperatura

relativamente às outras secções da parede, originando-se uma onda de calor que se propaga em direcção ao paramento interior que se encontra a uma temperatura inferior ^[15].

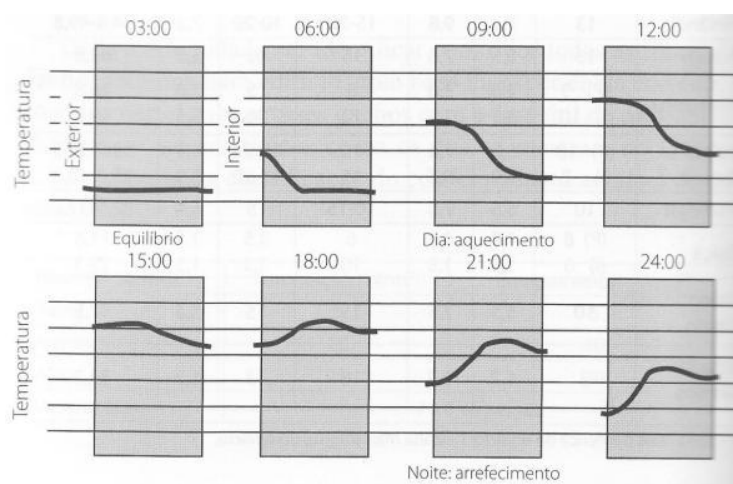


Figura 3.15 – Perfis de temperatura de uma parede pesada ao longo de um dia ^[15]

A velocidade à qual se processa esta transferência de calor depende da massa das sucessivas camadas da parede que a onda de calor encontra no seu trajecto e da respectiva condutibilidade térmica (λ). Neste processo, as camadas de parede, em função da sua massa e do seu calor específico, vão subtraindo calor à onda que as atravessa. O calor retido por cada camada específica de material primeiro eleva a sua temperatura e só mais tarde é retransmitido para as camadas adjacentes, resultando daqui um desfaseamento temporal da onda de calor ^[15].

A acção da temperatura e da radiação solar sobre o paramento exterior possui um carácter oscilatório pois provoca subidas e descidas alternadas de temperatura superficial com consequências a nível dos fluxos de calor que são estabelecidos. Deste modo, pode acontecer que a determinadas alturas do processo existam secções do interior da parede com temperatura superior às secções de montante (processo que é mais notado no período da noite), o que neste caso ocasiona uma inversão do fluxo de calor passando a propagar-se para o exterior. Devido a este facto, a onda de calor chega ao interior amortecida comparativamente à que chegaria se estivéssemos perante o caso de uma parede sem massa térmica. Estes conceitos são ilustrados na Figura 3.16 ^[15].

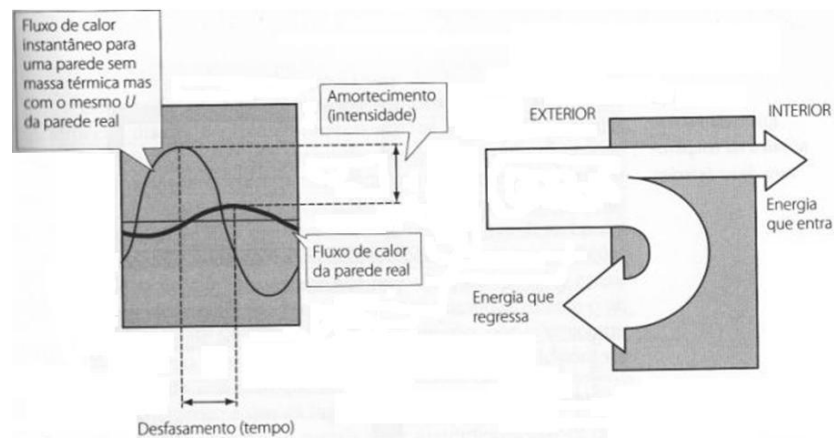


Figura 3.16 - Desfasamento e amortecimento da onda de calor através de uma parede ^[15]

Considerando todos estes fenómenos anteriores, pode concluir-se que a inércia térmica é uma característica que contribui para uma maior estabilização das temperaturas interiores relativamente às oscilatórias temperaturas no exterior permitindo, assim, uma diminuição de custos através da utilização racional de energia para a climatização dos espaços ^[15]. Através da Figura 3.17 é visível a diferença das amplitudes térmicas que se verifica no interior dos espaços.

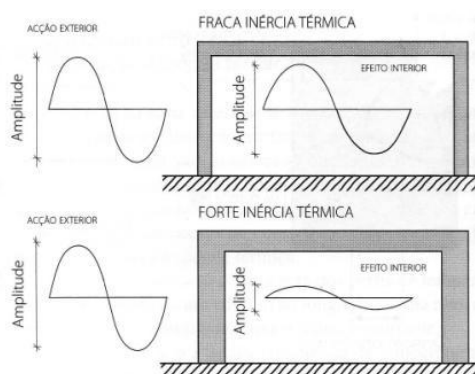


Figura 3.17 – Efeito da inércia térmica na temperatura do ar interior ^[15]

A estratégia para obter o conforto térmico passa pela utilização de materiais que possuam massa térmica – propriedade dependente do calor específico e da massa volumica – com uma capacidade que permita absorver, armazenar e transmitir o calor para o interior do edifício quando é necessário. A capacidade em questão depende também do volume e da resistência térmica do material e por consequência vai ser afectada se: o material com massa térmica tiver um valor de λ (condutibilidade térmica) baixo; a espessura do elemento for demasiado grande; o revestimento de parede tiver um valor de λ baixo; utilizar isolamento térmico pelo interior. Esta capacidade deve ser utilizada de modo equilibrado para cumprir as exigências para o espaço interior ^[15].

A inércia térmica interior de uma fracção autónoma é função da capacidade calorífica que os locais apresentam e depende da massa superficial útil de cada um dos elementos da construção. A massa superficial por metro quadrado de área útil de pavimento é calculada pela seguinte expressão ^[2]:

$$I_t = \frac{\sum M_{si} \cdot S_i \cdot r_i}{A_p} (\text{kg} / \text{m}^2 \text{ pavimento}) \quad (9)$$

Sendo:

M_{si} - massa superficial útil do elemento i (kg/m^2)

S_i - área da superfície interior do elemento i (m^2)

r_i - factor de redução que toma em conta a influência dos revestimentos superficiais interiores com propriedades de “isolamento térmico”

A_p - área útil de pavimento da respectiva fracção (m^2)

Descoberto o valor da massa superficial útil por metro quadrado de área útil de pavimento (I_t), as classes de inércia térmica, são definidas no RCCTE do seguinte modo ^[2]:

$$\left\{ \begin{array}{ll} I_t < 150 \text{ kg} / \text{m}^2 & -\text{Classe fraca} \\ 150 \leq I_t \leq 400 \text{ kg} / \text{m}^2 & -\text{Classe média} \\ I_t > 400 \text{ kg} / \text{m}^2 & -\text{Classe forte} \end{array} \right\} \quad (10)$$

A massa superficial útil M_{si} dos elementos de construção depende da massa total por unidade de área do elemento m_t e, ainda, dos seguintes aspectos:

- Da sua localização no edifício;
- Da sua própria massa superficial e da sua constituição, posicionamento e da qualidade do isolamento térmico;
- Das características térmicas do revestimento superficial interior.

Segundo o RCCTE, a inércia térmica de um edifício tem de ser média ou forte. Trata-se de um requisito mínimo de qualidade térmica dos edifícios ^[2].

3.3.6 Coeficiente transmissão térmica (U)

As temperaturas do ambiente exterior e interior são as de mais fácil obtenção de entre as temperaturas envolvidas nos processos de transmissão de calor (a exterior é registada pelos serviços meteorológicos e a interior porque é, normalmente, um valor nominal de conforto definido regulamentarmente), portanto existe toda a vantagem em definir uma forma de cálculo dos fluxos de calor que apenas necessite do conhecimento dessas mesmas temperaturas. Para tal, deduz-se um coeficiente apropriado para os elementos de construção que, aplicado à diferença entre as temperaturas referidas, forneça o valor correcto desses fluxos. Este coeficiente, que é deduzido, deve integrar os efeitos de todos os fenómenos de transmissão do calor envolvidos no processo (radiação, condução e convecção) designa-se por coeficiente de transmissão térmica de um elemento e é representado pela letra U ⁴ [15].

Para contrariar o fluxo de calor pode ser aumentada a resistência térmica da envolvente que diminuirá as trocas de calor e para determinar esta resistência pode ser realizada uma analogia com a corrente eléctrica onde a resistência eléctrica é fornecida através da razão entre a diferença de potencial e a intensidade. Assim sendo, a resistência térmica é a razão entre o gradiente de temperaturas e o fluxo de calor. A resistência térmica está directamente relacionada com a condutibilidade térmica (λ) e com a espessura. Deste modo, a resistência de um dado material homogéneo com uma espessura (e), é dada pela expressão:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{Q_x} = \frac{e}{\lambda} (m^2 \cdot ^\circ C / W) \quad (11)$$

Sendo:

e - espessura do material (m)

λ - condutibilidade térmica ($W / m^2 \cdot ^\circ C$)

O coeficiente de transmissão térmica U é o parâmetro inverso da resistência térmica e considerando uma parede como um material homogéneo é definido através da expressão:

⁴ Coeficiente de transmissão térmica (U) de um elemento da envolvente é a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que ele separa. [21]

$$U_{parede} = \frac{1}{R_{si} + \sum R_t + R_{se}} (W / m^2 \cdot ^\circ C) \quad (12)$$

Em que:

R_{si} - resistência térmica superficial interior da parede ($m^2 \cdot ^\circ C / W$)

R_t - soma das resistências térmicas de todos os elementos constituintes da parede

R_{se} - resistência térmica superficial exterior da parede ($m^2 \cdot ^\circ C / W$)

3.4 Soluções solares passivas e activas

O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, uma quantidade elevada de energia (avaliada em $1,5 \times 10^{18}$ kWh), correspondente a cerca de 10.000 vezes o consumo mundial de energia verificado no mesmo período ^[22].

Portugal é um dos países da Europa com melhores condições de aproveitamento deste recurso, dispondo de um número médio anual de horas de Sol, variável entre 2200 e 3000, no continente, e entre 1700 e 2200, respectivamente, nos arquipélagos dos Açores e Madeira. Comparando com os valores da Alemanha, verifica-se uma diferença considerável que variam entre 1200 e 1700. Estes valores podem proporcionar aproveitamentos interessantes na estação de Inverno, com importantes ganhos em termos de aquecimento dos edifícios mas, ao mesmo tempo, podem constituir um problema em termos de sobreaquecimento de espaços que poderão conduzir a problemas de desconforto térmico ^[22].

Para se obterem as condições ideais de conforto no interior dos edifícios conservando energia pode-se recorrer a tecnologias solares passivas e activas.

A energia térmica (sistemas solares activos) pode ser obtida captando a radiação solar num superfície que aquece ao absorver a radiação ou reflectindo a radiação para um ponto onde se concentram os raios solares reflectidos. Um exemplo de sistema solar activo é o colector solar térmico para aquecimento das águas quentes da habitação. Este sistema é uma tecnologia já dominada e, em 2002, existiam já instalados na União Europeia cerca de 12,3 milhões de metros quadrados de colectores solares térmicos. Cerca de 60% destes encontram-se na Alemanha (com mais de 50% das vendas de colectores solares da UE), Grécia e Áustria. A União Europeia possui como meta, a instalação de 100 milhões de m^2 de colectores até 2010. Algumas cidades já estabeleceram regulamentos municipais, como é o caso de Barcelona, Sevilha e Madrid que exigem a instalação de sistemas solares que garantam 60% do consumo de água quente das habitações e de edifícios de serviços ^[22].

O governo alemão, estabeleceu um aumento de incentivos de 92 para 125 euros por m^2 de superfície colectora instalada, o que provocou o relançamento do mercado em 2003. Ao ser

realizada uma comparação com a China, os números europeus são modestos pois em 2000 já existiam 26 milhões de metros quadrados de colectores solares e a meta do governo chinês para 2005 foi de 65 milhões de metros quadrados ^[22].

Em Portugal, a utilização de sistemas solares térmicos ou fotovoltaicos ainda se encontra longe de corresponder ao potencial deste recurso e na sequência do programa E4 – Eficiência Energética e Energias Endógenas, foi lançado o programa “Água Quente Solar para Portugal” que previa a instalação até 2010 de um milhão de metros quadrados de colectores solares. Os resultados do último inquérito realizado pelo Observatório para o Solar Térmico, com vista a determinar a área de colectores solares no nosso país em 2004, foi possível apurar a instalação de 16088 m² de colectores solares, dos quais 44% em pequenos sistemas domésticos e o restante em grandes sistemas ^[22].

Define-se sistema solar passivo como aquele que, incorporado no edifício e fazendo parte da sua estrutura construtiva, funciona como colector e acumulador da energia solar nele incidente, assim como agente de distribuição da energia-calor por meios naturais de transferência ^[28].

Caso seja pretendido um aumento de temperatura do edifício, este obtém-se à custa da radiação solar, permitindo a incidência dos raios solares sobre uma massa (o corpo acumulador, geralmente paredes). Através da opção de aplicação dispositivos de sombreamento, consegue-se obter um maior ou menor aquecimento do interior do edifício.

3.4.1 Exemplos de soluções passivas aplicáveis em projecto

Os sistemas passivos são dispositivos construtivos integrados nos edifícios cujo objectivo é contribuir para o aquecimento ou arrefecimento natural, ou seja, sem consumir energia. No caso de aquecimento (estação de Inverno), estes sistemas pretendem maximizar a captação de radiação solar proveniente do Sol existente nessa estação, através de vãos envidraçados correctamente orientados e dimensionados, aos quais se podem associar elementos de elevada massa térmica, que possibilitarão o armazenamento da energia solar e sua posterior utilização.

Estes dispositivos denominam-se sistemas de aquecimento passivo e são ^[29]:

- Sistemas de Ganho Directo - Envidraçado;
- Sistemas de Ganho Indirecto - Paredes Trombe, Parede Massiva, Colunas de água;
- Sistemas de Ganho Isolado - Espaço Estufa.

No caso de arrefecimento (estação de Verão), pretende-se tirar partido de fontes frias que permitirão arrefecer a habitação. Os dispositivos existentes para o arrefecimento denominam-se por Sistemas de Arrefecimento Passivo e são ^[29]:

- Ventilação Natural;
- Arrefecimento pelo Solo;
- Arrefecimento Evaporativo;
- Arrefecimento Radiativo.

3.4.2 Sistemas de ganho directo

O sistema solar passivo mais simples é o ganho directo e por essa razão é o sistema mais utilizado na construção. Cada envidraçado situado numa divisão útil de uma habitação, pode funcionar como um sistema de ganho directo.

As características básicas dos edifícios onde é utilizado o sistema de ganho directo são: uma área de captação orientada a Sul, com os espaços a aquecer directamente expostos à radiação solar e os paramentos interiores (paredes, lajes de tecto e piso) utilizados como armazenamento de calor ^[38].

As perdas de calor para o exterior por parte deste sistema são uma questão a ter em conta e para reduzir as mesmas deve-se recorrer à utilização de vidros duplos e/ou isolando os vidros durante a noite ou em dias de céu nublado através de sistemas de oclusão de boa capacidade de isolamento, sendo os mais comuns utilizados em Portugal as persianas de PVC exteriores e as portadas de madeira interiores ou exteriores. Nos sistemas de ganho directo, as considerações mais importantes relativamente aos ganhos solares a ter em conta são a dimensão e a localização dos envidraçados ^[38].

Nos sistemas de ganho directo os espaços a aquecer registam um aumento de temperatura muito rápido quase coincidente com a incidência da radiação solar através dos envidraçados, bem como tendência para elevadas amplitudes térmicas diárias no interior dos espaços. As massas térmicas envolventes possuem uma função estabilizadora nos valores das temperaturas interiores, uma vez que permitem armazenar os “excessos” de energia incidente ^[28].

Para o sistema de ganho directo obter um funcionamento eficiente é necessário respeitarem-se algumas condições ^[38]:

- Correcta orientação da janela, preferencialmente a Sul, para evitar que as perdas superem os ganhos no Inverno;
- Uso de dispositivos de sombreamento, como forma de prevenir o sobreaquecimento na estação do Verão;

- Redução das perdas de calor, com a aplicação de isolamento térmico eficiente dos elementos opacos.

Nos sistemas de ganho directo, o espaço a aquecer dispõe de vãos envidraçados correctamente orientados de modo a possibilitar a incidência da radiação no espaço e nas massas térmicas envolventes (paredes e pavimentos) ^[29]. O espaço a aquecer situa-se entre a superfície de captação e as superfícies de armazenamento, como é visível na Figura 3.18.

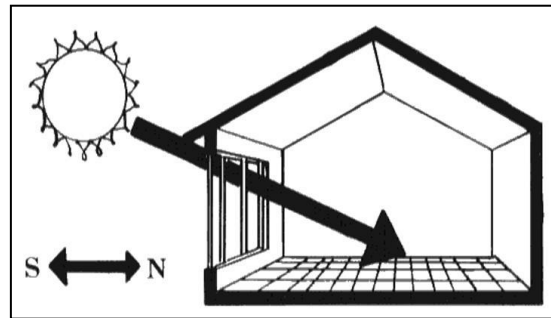


Figura 3.18 - Exemplo de um sistema de ganho directo

3.4.3 Sistemas de ganho indirecto

Nos sistemas de ganho indirecto, a massa térmica dos sistemas é interposta entre a superfície de captação e o espaço a aquecer. A radiação solar é absorvida pela massa transformando-se em energia térmica e é transferida para o interior do edifício através da condução de calor. Esta transferência de energia pode ser imediata ou desfasada, dependendo da solução de ventilação (ou não) que for adoptada. Dentro deste tipo de sistema, as paredes Trombe são as mais utilizadas e conhecidas.

O sistema de parede Trombe possui duas opções distintas de funcionamento (Ventilada (Figura 3.20) e Não Ventilada (Figura 3.19)) e as diferenças são descritas no capítulo 4.

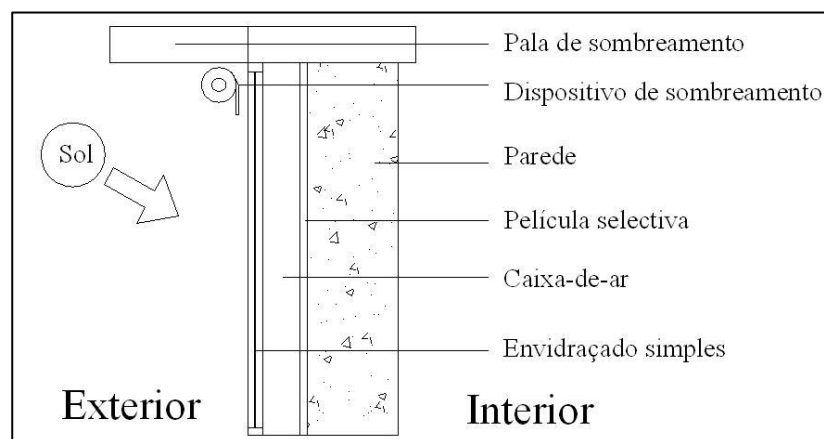


Figura 3.19 – Exemplo de uma parede Trombe não ventilada

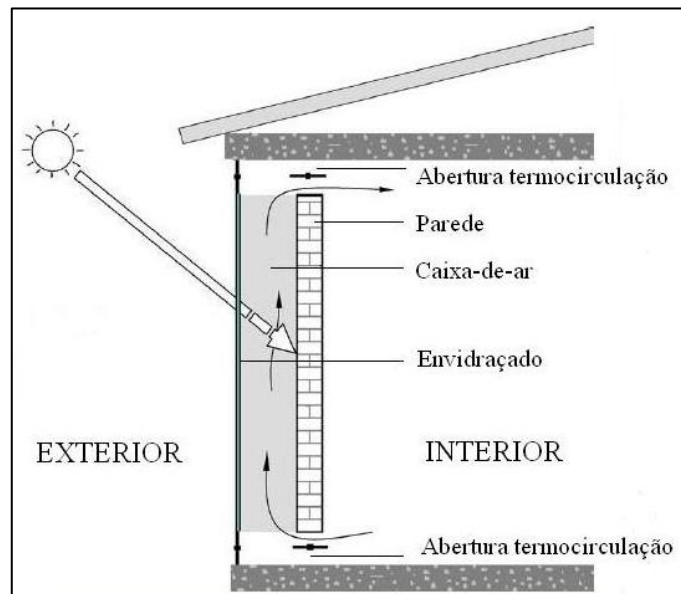


Figura 3.20 – Exemplo de uma parede Trombe ventilada ^[45]

3.4.4 Sistemas de ganho isolado

Neste sistema a captação dos ganhos solares e o armazenamento da energia captada não se encontram nas áreas ocupação por parte dos utilizadores das habitações. O denominado espaço estufa é um exemplo deste sistema e utiliza uma combinação dos efeitos de ganho directo e indirecto ^[38]. O funcionamento deste sistema consiste na transmissão da energia solar ao espaço adjacente à estufa por condução através da parede de armazenamento que os separa e ainda por convecção, no caso de existirem orifícios que permitam a circulação de ar.

Para este sistema é construída uma estufa na fachada Sul da casa (Figura 3.21), que irá captar a radiação solar e, entre ela e o ambiente habitável coloca-se uma parede com massa térmica elevada. A radiação é absorvida pela parede onde é convertida em calor que, posteriormente é transmitido para o interior ^[39].

Durante a estação do Verão devem ser colocados dispositivos de sombreamento para evitar sobreaquecimento do espaço interior.

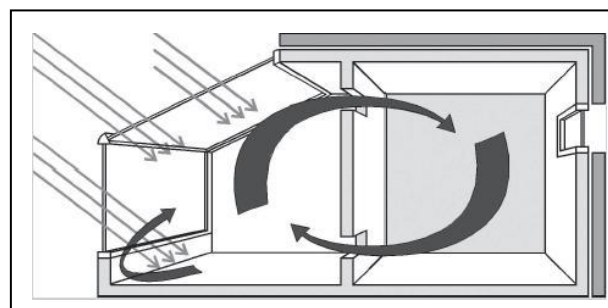


Figura 3.21 - Exemplo de um sistema de ganho isolado (Espaço Estufa) ^[18]

3.5 Estratégias Bioclimáticas

Um dos objectivos da concepção de edifícios bioclimáticos é a obtenção, através de processos passivos, das condições de conforto necessárias aos seus utilizadores através da utilização da energia solar. Estas soluções variam em função do clima, do local, do edifício – forma, sistema construtivo e também do tipo de utilização ^[29].

A noção de conforto térmico está associada a factores psicológicos e fisiológicos que variam de pessoa para pessoa e que podem conduzir a diferentes sensações de conforto térmico para as mesmas condições de ambiente térmico. O facto de o clima variar instantaneamente e do ser humano possuir capacidades para se adaptar às variações das condições térmicas que o envolvem faz com que todo o processo anteriormente mencionado seja considerado dinâmico ^[29]. Existe um conjunto de parâmetros que influenciam directamente o conforto térmico ^[29]:

- Factores pessoais: Actividade metabólica e vestuário;
- Factores ambientais: Temperatura do ar, temperatura média radiante, humidade relativa e velocidade do ar.

Os factores pessoais estão dependentes dos utilizadores dos edifícios e da sua actividade no interior dos mesmos.

Os factores ambientais estão dependentes da zona envolvente dos edifícios.

3.5.1 O Homem e as suas necessidades higrotérmicas

O Homem é um animal homeotérmico⁵, ou seja, a sua energia vital é conseguida através de fenómenos térmicos num processo chamado metabolismo.

A sua energia útil, é apenas 20% da metabolizada e os restantes 80% são transformados em calor e devem ser eliminados para que o equilíbrio seja mantido. Sempre que o organismo, através do seu sistema termo regulador, necessita de trabalhar muito para manter este equilíbrio, ocorre a fadiga e a consequente queda de rendimento das actividades, numa primeira fase, e a longo prazo, algum tipo de dano físico (tonturas, desmaio, entre outros). Deste modo, o conforto higrotérmico obtém-se sempre que se consegue manter, através das trocas higrotérmicas (Figura 3.22), um equilíbrio entre o seu corpo (aproximadamente 36,7°C) e a sua envolvente ^[10].

⁵ A homeotermia é uma característica de alguns animais (aves e mamíferos) que lhes permite manter a sua temperatura corporal relativamente constante à causa de uma alta taxa metabólica.

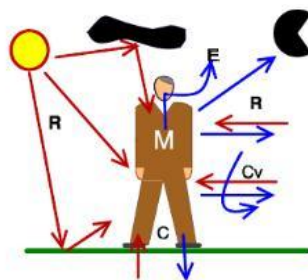


Figura 3.22- Trocas higrótérmicas entre o Homem e a sua envolvente ^[10]

Sendo:

M – Metabolismo, ou a produção de calor interno do corpo.

R – Trocas por radiação. Entre o Sol e o corpo e os demais corpos (paredes, etc.).

C – Trocas por condução, contacto. Entre o corpo e a superfície em que ele toca.

Cv – Trocas por convecção. Entre o corpo e o ar que se encontra em seu contacto directo.

E – Trocas por evaporação. Eliminação do calor pela troca pulmonar, na expiração e através da pele, pelos poros.

As trocas ilustradas anteriormente ocorrem durante o quotidiano do ser humano e podem trocar de sentido – de perda para ganho de calor – se existir mudança de local, de momento (dia/noite), de actividade (metabolismo) e do tipo de vestuário. Para que o Homem esteja em sensação de conforto higrótérmico, o fundamental é que o somatório dessas trocas seja nulo. Ou seja, todo o calor que o ser humano esteja a produzir em excesso possa ser eliminado e que não ocorra a perda de calor necessário à manutenção do equilíbrio interno ^[10].

O rendimento de qualquer actividade, possui uma ligação com as condições higrótérmicas da sua envolvente e para serem conhecidos esses valores, foram realizadas várias pesquisas com inúmeras pessoas em situações distintas. Os resultados obtidos dos estudos foram transformados em gráficos de auxílio ao diagnóstico de conforto higrótérmico denominados de diagramas bioclimáticos. Estes gráficos interpretam os valores instantâneos de humidade e temperatura do ar em função de parâmetros de conforto. O gráfico de Olgyay (Figura 3.23) e o gráfico de Givoni (Figura 3.24) são os gráficos mais conhecidos relativamente a esta temática ^[10].

Olgyay, em 1963, foi o primeiro a propor um procedimento sistemático para adaptar o projecto de um edifício aos requerimentos humanos e condições climáticas. Este método baseia-se numa carta bioclimática que apresenta a zona de conforto humano em relação à temperatura e humidade do ar ambiente, temperatura radiante média, velocidade do vento, radiação solar e arrefecimento evaporativo ^[66].

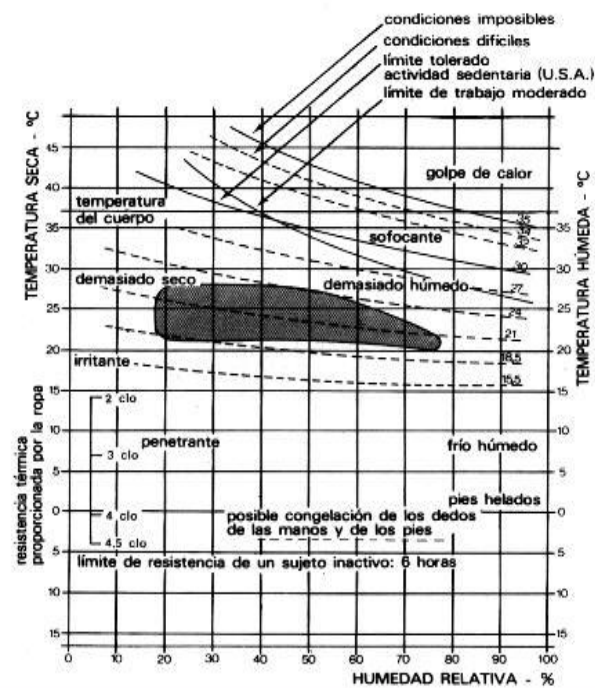


Figura 3.23 – Carta bioclimática de Olgay^[44]

Em 1969, Givoni concebeu uma carta bioclimática para edifícios que corrigia algumas limitações do diagrama idealizado por Olgay. A carta de Givoni baseia-se em temperaturas internas do edifício, propondo estratégias construtivas para uma adequação do edifício ao clima, enquanto que Olgay aplicava o seu diagrama estritamente para as condições externas [36], [66].

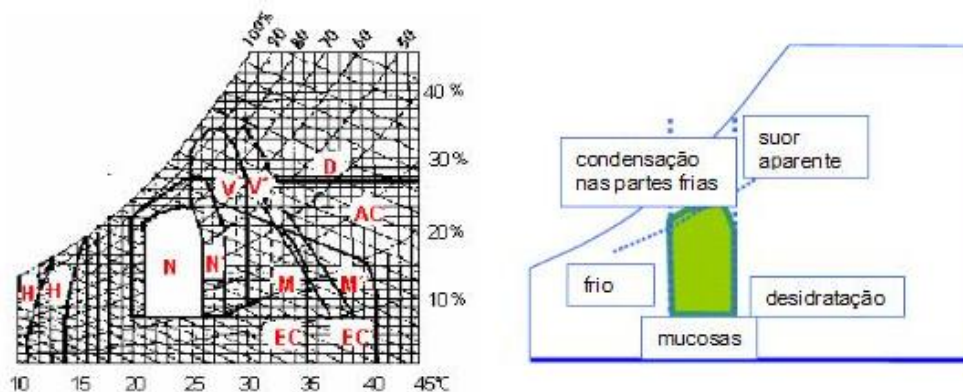


Figura 3.24 – Diagrama original e as situações “vivas” fora do polígono de conforto^[10]

Sendo:

N, N' – zona de conforto e zona de conforto ainda aceitável.

EC, EC' – arrefecimento através da evaporação.

D – desumidificação necessária.

V, V' – arrefecimento através da ventilação.

AC – arrefecimento através de métodos activos (condicionamento do ar).

W – necessidade de humedificação suplementar.

H, H' – limite do aquecimento por métodos passivos.

M, M' – uso de materiais da envolvente construtiva

O diagrama de Givoni identifica “zonas” de conforto e/ou estratégias de arquitectura bioclimática em função dos valores que encontramos no local de humidade e temperatura do ar. Fora do polígono central – N ou verde na Figura 3.24 – encontram-se situações climáticas associadas à sensação de desconforto higrotérmicas, que podem ser corrigidas ou minoradas se aplicarmos as respectivas estratégias ^[10].

3.5.2 Conceção de um edifício

O desempenho energético de um edifício está relacionado com as estratégias adoptadas na concepção do mesmo. No caso de um edifício estar pouco adaptado ao clima, será necessário um maior consumo de energia para atingir as condições de conforto pretendidas pelos ocupantes ^[29].

Retomando a figura das trocas higrotérmicas apresentada anteriormente, pode-se inserir os elementos construtivos mais comuns e analisá-los (Figura 3.25).

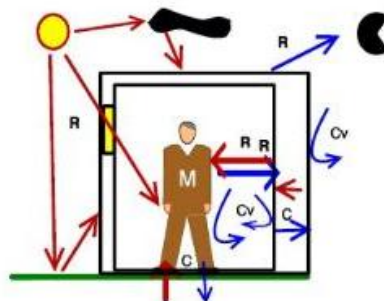


Figura 3.25 – Principais trocas higrotérmicas entre o homem e a construção ^[10]

Sendo:

R – trocas por radiação: Entre o Sol e o edifício, entre a abóbada celeste e a construção, entre o corpo e as paredes.

C – trocas por condução: Contacto entre o corpo e toda a superfície em que ele toca, através das paredes.

Cv – trocas por convecção: Entre o corpo e o ar que está em seu contacto directo, entre o ar e as paredes.

As estratégias bioclimáticas são estratégias que têm em conta as condições climáticas do local e da sua interacção com o clima, promovendo assim uma adequação do edifício ao

clima. Quando se realiza um projecto de um edifício solar passivo ou bioclimático deve-se começar pela selecção criteriosa do local de implantação e da orientação do mesmo com o intuito de otimizar os ganhos solares no mesmo. A informação de variáveis como a temperatura exterior ao longo do ano, a amplitude térmica em virtude da função que desempenha no estabelecimento de fluxos energéticos: perdas e ganhos térmicos e do potencial em termos de ventilação, são fundamentais para o bom desempenho energético do edifício ao longo da sua vida útil ^[29].

Pode-se definir estratégias bioclimáticas como um conjunto de regras que influenciam a forma do edifício, sistemas e componentes construtivos. As estratégias que são adoptadas para um edifício ou projecto deverão ser escolhidas, tendo em conta a especificidade climática do local, a função do edifício, o modo de ocupação e operação do mesmo, com o objectivo de promoverem um bom desempenho em termos de adaptação ao clima local. Seguindo estas regras, e utilizando as estratégias bioclimáticas, o edifício estará mais próximo de atingir as condições de conforto térmico ou de diminuir os consumos energéticos para atingir as mesmas ^[29].

Baruch Givoni, especialista em Arquitectura Bioclimática, propõe a relação entre o conforto humano, o clima e os edifícios. O professor entende arquitectura como o edifício que contém e protege o homem e suas actividades. Para estudar estas questões, analisou o diagrama psicrométrico e traçou zonas de conforto higrotérmico para Inverno e Verão. A carta bioclimática de Baruch Givoni (Figura 3.26) faz uma síntese num diagrama psicrométrico do tipo de estratégias que devem ser utilizadas para cada clima particular. Nesta carta, devem registar-se as ocorrências dos estados do ar (em termos de temperatura e humidade) verificados no exterior ^[29].

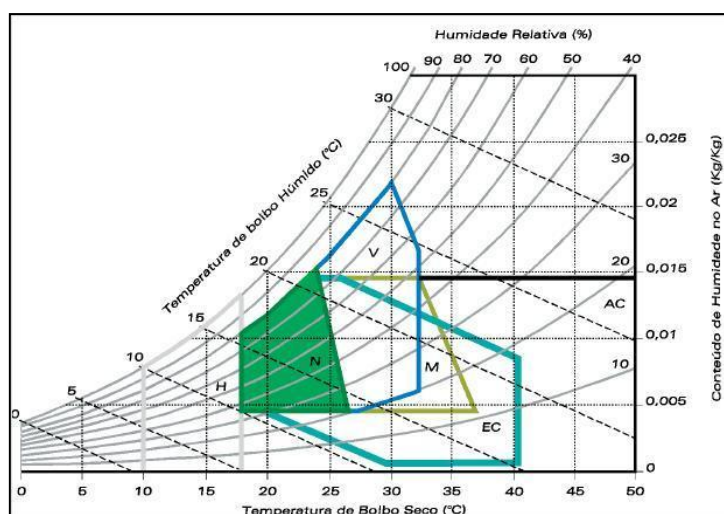


Figura 3.26 - Carta Bioclimática de Baruch Givoni ^[29]

As diferentes localizações das ocorrências dos estados do ar presentes na carta apresentam geralmente a forma de uma mancha com vários pontos, sendo essa localização indicadora do tipo de clima do local e consequentemente do tipo de estratégias mais adequadas para o bom desempenho térmico do edifício ^[29]:

Para as estratégias de aquecimento ^[29]:

- Restringir as perdas por condução - **Zonas H** na Carta Bioclimática, correspondendo a climas de países que têm um Inverno rigoroso – como estratégias recomenda-se a aplicação de materiais isolantes nos elementos construtivos (paredes, coberturas, pavimentos e envidraçados) ^[29];
- Restringir as perdas por infiltração e restringir o efeito da acção do vento no exterior do edifício - **Zonas H** na Carta Bioclimática, correspondendo a climas de países que têm um Inverno rigoroso - como estratégias recomenda-se: execução de caixilharias de janelas com uma vedação eficiente, protecção dos ventos dominantes com vegetação e escolha de uma boa localização para o edifício ^[29];
- Promover os ganhos solares - **Zonas H** da Carta Bioclimática, correspondendo a climas de países que têm um Inverno rigoroso – como estratégia recomenda-se a utilização de sistemas solares passivos de aquecimento ^[29].

Para as estratégias de arrefecimento ^[29]:

- Promover ventilação natural - **Zonas V**, da Carta Bioclimática, correspondendo a climas de tipo tropical e equatorial, ou temperado de influência marítima - existem bons exemplos de aplicação desta estratégia em casas de inércia leve típicas da arquitectura vernácula das regiões tropicais e nos sistemas de arrefecimento por ventilação ^[29];
- Restringir ganhos solares - **Zonas V, EC, AC, M e W**, da Carta Bioclimática, correspondendo a todos os climas que necessitam de arrefecimento ^[29];
- Promover o arrefecimento por evaporação - **Zonas EC e M** da Carta Bioclimática, correspondendo a climas temperados secos, e climas de regiões desérticas áridas e muito secos - existem bons exemplos destas estratégias em toda a arquitectura do médio oriente ^[29];
- Promover o arrefecimento por radiação - **Zonas M**, da Carta Bioclimática, correspondendo a todos os climas quentes de influência continental de elevadas amplitudes térmicas – existem bons exemplos desta estratégia em toda a arquitectura

do médio oriente e também no Sul da Europa particularmente em Portugal (Alentejo e Algarve) e Espanha (Andaluzia) ^[29].

A **zona N** corresponde à zona (Neutra) de conforto para o ser humano onde as condições de clima exterior estão próximas das condições de conforto. Neste caso particular, a arquitectura deverá ter especial atenção com os ganhos solares excessivos e requer que não sejam cometidos outros erros graves em matéria de trocas térmicas por ventilação e condução. Nas **zonas AC** não é possível atingirem-se estados de conforto térmico sem recurso à utilização de meios mecânicos não passivos ^[29].

As estratégias bioclimáticas a considerar para as estações de Verão e Inverno apresentam-se no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Estratégias Bioclimáticas ^[29]

		Condução	Convecção	Radiação	Evaporação
INVERNO	Promover ganhos			Promover ganhos solares	
	Reduzir perdas	Minimizar perdas por transmissão	Minimizar infiltrações		
VERÃO	Evitar ganhos	Minimizar por transmissão	Minimizar infiltrações	Minimizar ganhos solares	
	Promover perdas	Promover perdas pelo solo	Promover ventilação	Promover arrefecimento por radiação	Promover arrefecimento por evaporação

A regulamentação portuguesa (RCCTE ^[21]) caracteriza três tipos de clima para Inverno - I1,I2,I3 – e três tipos de clima para Verão – V1, V2, V3. São efectuadas algumas correcções devidas a factores que têm em conta a altitude e a proximidade à orla costeira e cada concelho do território nacional possui uma classificação I e V.

3.5.3 Estratégias bioclimáticas segundo zonas climáticas definidas no RCCTE

No caso de estudo da presente dissertação compara-se duas cidades pertencentes a zonas climáticas diferentes definidas pelo RCCTE. Considera-se a cidade de Lisboa pertencente à zona I1-V2 e a cidade de Guimarães pertencente à zona I2-V2. Foram escolhidas estas duas cidades porque são de zonas climáticas distintas de Inverno definidas pelo RCCTE. De seguida encontram-se as estratégias bioclimáticas a considerar para as duas zonas distintas.

3.5.3.1 Zona I1-V2

Esta zona climática definida no RCCTE abrange os seguintes concelhos (Figura 3.27):

- Albufeira, Alenquer, Anadia, Arruda dos Vinhos, Barreiro, Coimbra, Faro, Grândola, Lagoa, **Lisboa**, Loulé, Loures, Mealhada, Moita, Mortágua, Odivelas, Olhão, Santa Comba Dão, Santiago do Cacém, São Brás de Alportel, Seixal, Sesimbra, Setúbal, Silves, Sobral de Monte Agraço, Soure, Tavira.

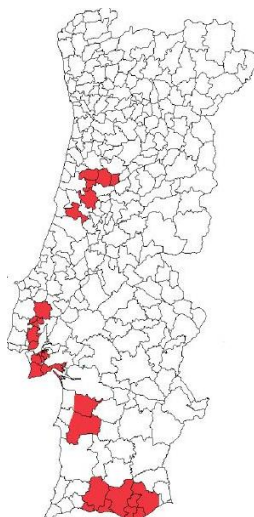


Figura 3.27 – Localização dos concelhos com clima I1-V2 ^[29]

Na **Zona I1-V2** - Litoral Sul e Algarve, Região de Lisboa e alguns concelhos da zona Centro. A influência marítima suaviza alguns destes climas. A estação do Verão deverá merecer um cuidado mais especial que o Inverno. Os Graus dias de Aquecimento⁶ variam entre 1490 (Soure) e 1010 (Olhão). Nesta estação, devido à preponderância da influência estabilizadora marítima verificam-se menores amplitudes térmicas diárias ^[29].

A cidade de Lisboa possui 1190 Graus dias de Aquecimento ^[21].

Estratégias Bioclimáticas relevantes a considerar ^[29]:

Na estação de aquecimento (Inverno) – Deverá ser restringida a condução e deverão ser promovidos os ganhos solares.

Na estação de arrefecimento (Verão) – Deverá ser restringida a condução e os ganhos solares pelo que os envidraçados deverão ser eficazmente sombreados. Deverá ser promovida a ventilação.

⁶ Graus-dias de aquecimento define-se como o somatório das diferenças positivas registadas entre a temperatura base (de 20°C) e a temperatura do ar exterior ao longo da estação de aquecimento. ^[2]

Quadro 3.2 - Estratégias bioclimáticas para o Clima I1-V2 ^[29]

Estação	Estratégias Bioclimáticas	Sistemas Passivos
Inverno – Estação de Aquecimento	Promover Ganhos Solares	Todos os sistemas de ganho são adequados para os tipos de edifícios mais convenientes
	Restringir perdas por condução	Isolar a envolvente
	Promover inércia forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior
Verão – Estação de Arrefecimento	Restringir ganhos solares	Sombrear envidraçados
	Restringir ganhos por condução	Isolar a envolvente
	Ventilação	Ventilação transversal (nocturna), tubos enterrados
	Promover inércia forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior

3.5.3.2 Zona I2 -V2

Esta zona climática definida no RCCTE abrange os seguintes concelhos (Figura 3.28):

- Alcanena, Amarante, Amares, Ansião, Arganil, Belmonte, Braga, Carregal do Sal, Celorico de Basto, Condeixa-a-Nova, Fafe, Felgueiras, **Guimarães**, Lousa, Lousada, Mangualde, Marco de Canavezes, Miranda do Corvo, Monção, Nelas, Oliveira do Hospital, Paços de Ferreira, Penacova, Penafiel, Penela, Pombal, Ponte de Lima, Póvoa do Lanhoso, Rio Maior, Santo Tirso, São Pedro do Sul, Tábua, Tondela, Valença, Vila Nova de Cerveira, Vila Nova de Ourém, Vila Nova de Poiares, Vila Verde, Viseu, Vizela.

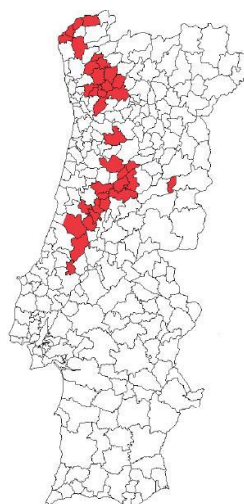


Figura 3.28 - Localização dos concelhos com clima I2-V2 ^[29]

Na **Zona I2-V2** – Os Graus dias de Aquecimento variam entre 2090 (Fafe) e 1510 (Penacova). No Verão, as amplitudes térmicas diárias poderão considerar-se com valores médios, o que já exige cuidados maiores com a inércia térmica dos edifícios ^[29].

A cidade de Guimarães possui 1770 Graus dias de Aquecimento ^[21].

Estratégias Bioclimáticas relevantes a considerar ^[29]:

Na estação de aquecimento (Inverno) – Deverá ser restringida a condução e deverão promover-se os ganhos solares. Deverá haver especial atenção à promoção dos ganhos solares nos alçados de orientação Sul.

Na estação de arrefecimento (Verão) – Deverá ser restringida a condução e os ganhos solares pelo que os envidraçados deverão ser eficazmente sombreados. Deverá ser promovida uma inércia forte aos edifícios.

Quadro 3.3 - Estratégias bioclimáticas para o Clima I2-V2 ^[29]

Estação	Estratégias Bioclimáticas	Sistemas Passivos
Inverno – Estação de Aquecimento	Promover Ganhos Solares	Todos os sistemas de ganho são adequados para os tipos de edifícios mais convenientes
	Restringir perdas por condução	Isolar a envolvente
	Promover inércia forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior
Verão – Estação de Arrefecimento	Restringir ganhos solares	Sombrear envidraçados
	Restringir ganhos por condução	Isolar a envolvente
	Ventilação	Ventilação transversal (nocturna), tubos enterrados
	Arrefecimento Evaporativo	Promover ventilação com pequenas velocidades de ar através de fontes, lagos, espelhos de água, etc.
	Promover inércia forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior

3.6 Síntese

Como síntese deste capítulo conclui-se que é possível realizar uma correcta gestão de recursos recorrendo à eficiente utilização de recursos naturais desde a fase de concepção dos edifícios.

O calor resultante da radiação solar pode ser aproveitado para o aquecimento dos edifícios sem necessidade de recorrer a sistemas activos que consomem energia. Portugal possui um elevado potencial para aproveitamento de energia solar pelo que existe a possibilidade de conceber soluções que utilizem a luz solar para reduzir os consumos de energia e consequentemente redução de custos. Uma destas possibilidades de utilização ou conversão da energia solar é a “solução passiva”, na qual o aproveitamento da energia solar para aquecimento do edifício é realizado através de elementos de construção.

A parede Trombe é uma solução passiva de aproveitamento da energia solar para aquecimento através da sua introdução na fase de projecto do edifício. A adopção desta

solução de parede para aproveitamento da luz solar e reduzida manutenção, é uma solução eficiente para contribuir na redução de consumos de energia.

Adaptando o edifício às condições climáticas do local e da sua interacção com o clima, o mesmo estará mais próximo de atingir as condições de conforto térmico conseguindo assim uma redução no consumo energético. As estratégias bioclimáticas podem ser consideradas como regras gerais que se destinam a orientar a concepção do edifício tirando partido das condições climáticas de cada local.

As simulações foram realizadas através do software *EnergyPlus* para as cidades de Lisboa e Guimarães por serem de zonas climáticas de Inverno distintas definidas pelo RCCTE, visto que o sistema de parede Trombe é útil para a estratégia de aquecimento.

Verifica-se uma diferença considerável de Graus dias de aquecimento entre a cidade de Lisboa (1190) e Guimarães (1770).

Através da análise das estratégias bioclimáticas para os locais onde serão feitas as simulações de caso de estudo (Lisboa e Guimarães) conclui-se que, em ambos os casos, uma das estratégias de aquecimento é a promoção de energia solar através de sistemas solares passivos como, por exemplo, a parede Trombe.

4 Parede Trombe

4.1 Sistemas de Funcionamento e Sistemas Construtivos

A parede Trombe é um sistema solar passivo - de ganhos indirectos -, composto por um envidraçado na superfície exterior. Trata-se de uma parede com elevada inércia térmica integrada nos alçados orientados a Sul, em espaços onde é pretendido o contributo dos ganhos solares durante a estação de Inverno, aproveitando o seu calor transmitido para o interior da habitação durante a noite.

A radiação solar atinge a parede de elevada inércia térmica aquecendo-a. O calor absorvido pela parede é, posteriormente, transferido através de um lento processo para o interior da habitação ^[17].

A parede Trombe deve ser correctamente orientada e possuir soluções de sombreamento eficazes (palas de sombreamento, persianas) porque apenas nesta posição funciona correctamente aquecendo o interior das habitações durante a estação de Inverno sem prejudicar o conforto térmico com os ganhos solares excessivos durante a estação de Verão.

Os projectistas podem conjugar o sistema de parede Trombe com um envidraçado estrategicamente colocado permitindo a penetração da luz solar e consequente aquecimento com o intuito de auxiliar o aquecimento do edifício através de um sistema de ganho directo ^[60].

A aplicação de revestimentos como placas de gesso cartonado na superfície interior da parede Trombe pode reduzir a quantidade de calor libertada para o interior da habitação devido ao possível espaço de ar entre a parede de betão e superfície interior afectando, deste modo, o correcto funcionamento do sistema ^[60].

O sistema de parede Trombe possui duas opções distintas de funcionamento (Ventilada e Não Ventilada) e essas diferenças de funcionamento são descritas no ponto seguinte.

4.1.1 Parede Trombe não ventilada (PTNV)

A superfície exterior da PTVN deverá ser pintada de cor escura ou deverá conter uma película selectiva com elevado coeficiente de absorção solar (ver Figura 4.1). Neste sistema, os raios solares atravessam o envidraçado situado na superfície exterior da parede Trombe não ventilada (PTNV) e aquecem a zona de armazenamento de calor. O calor armazenado que se acumula neste espaço vai, progressivamente aquecendo a parede libertando, mais tarde, calor para o interior da habitação. Este processo de transferência de calor para o espaço interior da

habitação é realizado por condução e o tempo que o mesmo demora a ser transferido para o interior depende da espessura e material da parede ^[38].

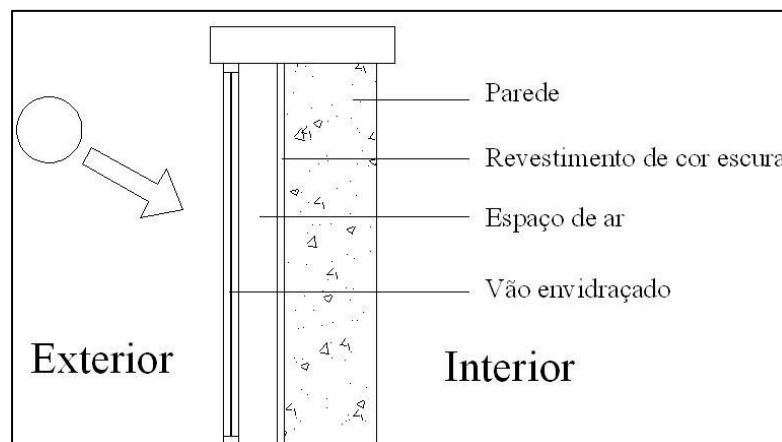


Figura 4.1 – Exemplo de uma parede Trombe não ventilada (PTNV)

Segundo um estudo efectuado no NREL (*National Renewable Energy Laboratory, USA*) uma PTNV composta por betão com 20cm de espessura liberta o calor para o interior da habitação passadas 8 a 10 horas após o início do armazenamento de calor ^[60].

A parede Trombe não ventilada é recomendável para espaços com ocupação nocturna devido ao processo de transferência de calor através da mesma ter a duração de várias horas. Numa habitação, a zona aconselhada para implementação deste sistema é o quarto visto ser a divisão na qual os habitantes ocupam e frequentam em horários nocturnos.

Relativamente aos materiais de armazenamento e construção utilizados nas PTNV, deverão ter uma elevada capacidade térmica para armazenar energia durante o dia e libertá-la durante a noite e poderão ser de diferentes tipos: betão, adobe ou pedra.

A espessura da parede acumuladora a utilizar varia em função das propriedades do material (densidade, calor específico e condutibilidade) e do desfasamento pretendido sendo este, o factor determinante para conseguir a transferência do calor ao interior da habitação. O valor de coeficiente transmissão térmica (U) de uma parede acumuladora com vidro simples, dificilmente toma valores abaixo de $1\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, que é um valor, normalmente superior ao de paredes exteriores correntes e isto é explicado pelo facto de não ser aplicada uma camada de isolamento térmico na parede, pois iria reduzir, consideravelmente, o fluxo térmico por condução deixando de funcionar como parede acumuladora de calor ^[38].

Este sistema tem problemas de sobreaquecimento na estação de arrefecimento e para solucionar essa questão deverá ser introduzida uma pala de sombreamento e um dispositivo de sombreamento (persianas).

Existem alguns factores que contribuem directamente para o desempenho da PTNV e este é tanto melhor se:

- O factor de obstrução for pequeno no Inverno e grande no Verão (através da introdução de palas de sombreamento, persianas ou colocação de árvores de folha caduca na zona circundante);
- O envidraçado exterior possuir uma elevada transmissividade;
- O coeficiente de absorção solar da superfície exterior for elevado (através da aplicação de pintura de cor preta ou uma película selectiva com baixa emissividade).

A eficiência do sistema das PTNV, na sua generalidade, pode ser melhorada através da utilização de dispositivos de sombreamento e o correcto funcionamento realiza-se de acordo com os seguintes procedimentos:

- **No Inverno:** o dispositivo de sombreamento existente (persianas) deverá estar aberto para absorver o máximo de radiação solar e, deste modo, aquecer a parede para posterior libertação de calor para o interior (Figura 4.2).
- **No Verão:** o dispositivo de sombreamento (persianas) existente deverá estar fechado para não haver sobreaquecimento do espaço (Figura 4.3).

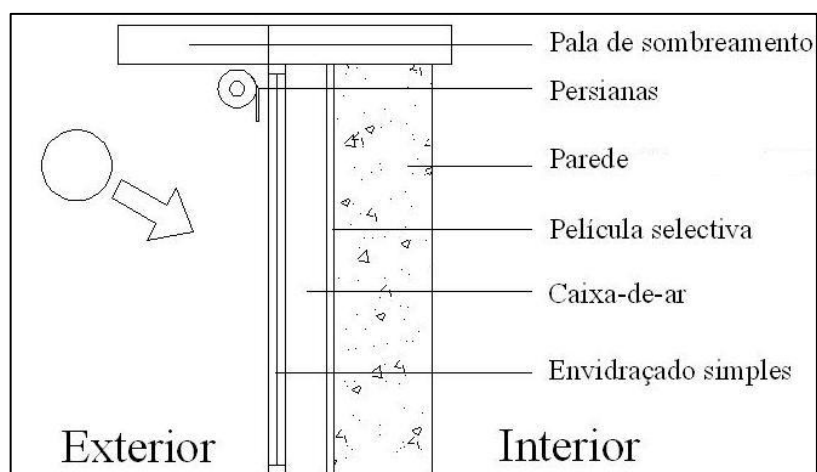


Figura 4.2 - Parede Trombe não ventilada durante o Inverno

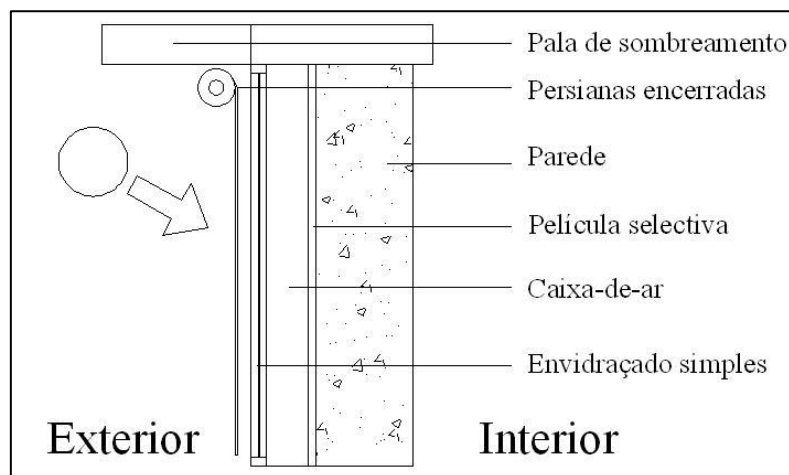


Figura 4.3 – Parede Trombe não ventilada no Verão

4.1.2 Parede Trombe ventilada (PTV)

Tal como nas PTNV, este sistema também deve ter a superfície exterior da parede pintada com uma cor escura com elevada absorvidade ou conter uma película selectiva de baixa emissividade.

Este sistema possui aberturas na sua parte inferior e superior onde se efectuam trocas de circulação de ar permitindo assim que estas contribuam para o aquecimento (Figura 4.4).

A radiação solar atravessa o envidraçado situado na superfície exterior da parede Trombe, aquecendo-a. O calor absorvido pela parede é transmitido posteriormente por convecção e condução caso os orifícios estejam abertos, ou apenas por condução, caso os orifícios estejam fechados. Deve ser previsto, nas aberturas de ventilação, a instalação de sistemas que possibilitem o controlo do fluxo permitindo, deste modo, controlar as temperaturas interiores evitando condições de sobreaquecimento durante o dia ^[38].

A utilização da solução de paredes Trombe com ventilação é aconselhável para os espaços de ocupação diurna porque o calor é transmitido para o interior da habitação mais rapidamente comparativamente com as paredes Trombe sem ventilação. Tal como nas PTNV, as PTV deverão ser compostas por materiais de elevada capacidade térmica para armazenar energia durante o dia e libertá-la durante a noite e poderão ser de diferentes tipos: betão, adobe ou pedra.

O funcionamento correcto deste sistema é muito importante para o seu desempenho. Na estação de aquecimento, quando é necessário aquecer o interior da habitação, a abertura da ventilação inferior permite a entrada de ar frio que, ao aquecer na caixa-de-ar entre o envidraçado e a parede, diminui a sua densidade e sobe até sair pela abertura de ventilação superior da parede aquecendo, deste modo, o espaço interior da habitação através de um

sistema de circulação de ar interior. Este sistema de circulação do ar interior pode ser compreendido na Figura 4.4 ^[38].

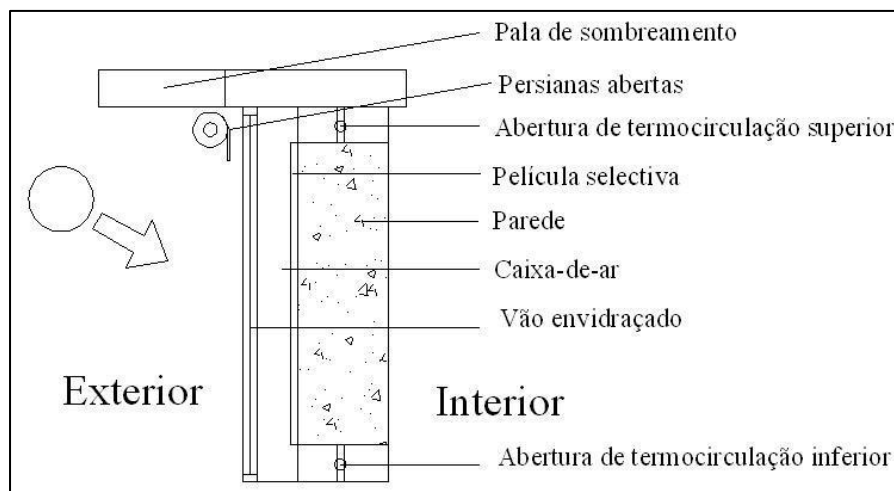


Figura 4.4 - Parede Trombe ventilada durante o dia no Inverno.

A eficiência do sistema das PTV, na sua generalidade, pode ser melhorada através da utilização de dispositivos de sombreamento e o correcto funcionamento realiza-se de acordo com os seguintes procedimentos ^[38]:

- **No Inverno:** As aberturas deverão estar abertas para o ar frio entrar no orifício inferior, aquecer no espaço de ar que se encontra quente e entrar para o interior da habitação através do orifício superior aquecendo o espaço (Figura 4.4); o dispositivo de sombreamento (persianas) deverá estar aberto para absorver o máximo de energia proveniente do Sol.
- **No Verão:** as aberturas de ventilação devem estar fechadas e deverá ser previsto o sombreamento do sistema com o objectivo de minimizar a radiação incidente no envidraçado.

4.1.3 Vantagens e inconvenientes da parede Trombe

No Quadro 4.1 são apresentadas as principais vantagens e inconvenientes da parede Trombe comparativamente aos sistemas de ganho directo (envidraçados).

Quadro 4.1 - Principais vantagens e inconvenientes da parede Trombe

Vantagens	Inconvenientes
Reduz o consumo de energia para o aquecimento (possui vantagens ambientais e económicas)	Sobreaquecimento na estação de arrefecimento caso não sejam aplicadas soluções de sombreamento eficazes (palas de sombreamento e persianas)
Protecção contra a degradação ultravioleta e privacidade no compartimento interior ^[37]	Espessura total da parede elevada diminuindo o espaço útil da habitação ^[37]
Sistema solar passivo de baixa manutenção	Na parede Trombe ventilada, o correcto funcionamento não é de fácil implementação junto dos utilizadores
As oscilações de temperatura no interior da habitação são menores, aumentando o conforto interior das habitações ao longo do ano	Ausência de iluminação natural ^[37]

4.2 Pré-dimensionamento

Em termos de pré-dimensionamento de um sistema de parede Trombe, enquanto elemento de auxílio para a modelação da solução e eficiência do desempenho, podem ser adoptados procedimentos diversos onde se destacam:

- A norma pr EN ISO 13790 é utilizada para cálculo do consumo de energia para aquecimento e arrefecimento nos edifícios.

O anexo “E” desta norma que define os procedimentos para o cálculo da transferência de calor e dos ganhos solares através de elementos especiais, tais como, estufas, elementos opacos com insolação transparente e paredes Trombe ventiladas.

No caso particular da parede Trombe não ventilada, o procedimento a adoptar é o cálculo da área colectora efectiva através do método de cálculo presente no anexo E.3 – elementos opacos com insolação transparente (*Opaque elements with transparent insulation*)^[43].

Esta norma serve de auxílio ao projectista para o cálculo da área de parede Trombe a adoptar em função de parâmetros como a absorção solar da película selectiva, factor solar do envidraçado (g_{\perp}^7), factor de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado (F_f) e coeficientes de transmissão térmica (U) dos materiais da solução construtiva adoptada^[43].

- O trabalho de Edward Mazria (1983) desenvolvido no México em que é considerado que o dimensionamento de uma parede Trombe depende de vários factores nos quais o clima

⁷ Factor solar do vão envidraçado (g_{\perp}) é a relação entre a energia solar transmitida para o interior através do vão envidraçado em relação à radiação solar incidente na direcção normal ao envidraçado.^[2]

é o preponderante e a área útil de pavimento face à relação com a área de parede Trombe. A unidade de medida considerada no estudo foi o m^2 (área de parede Trombe) e o $^{\circ}C$ (temperatura média de Inverno). De salientar que este estudo foi desenvolvido para a latitude do México.

4.3 Exemplos em Portugal

Neste ponto considerou-se importante proceder à referenciação de alguns exemplos de aplicação da parede Trombe em edifícios já construídos em Portugal.

4.3.1 Condomínio Quinta Verde

Habitação: Casa inserida no Condomínio Quinta Verde

Localização: Nafarros, Sintra

Arquitectura: Arq^a Livia Tirone

Construção: 2000

Este caso de estudo foi objecto de visita e de contacto com os utilizadores do edifício. A visita ocorreu no dia 31/01/2011, pelas 16h à habitação bioclimática inserida no Condomínio Quinta Verde em Sintra dia em que a temperatura do ar exterior era de $12^{\circ}C$. Trata-se de uma vivenda com cinco assoalhadas com isolamento térmico contínuo pelo exterior e dotada de sistemas de ganho directo e indirecto orientados a Sul. A habitação possui quatro paredes Trombe com a superfície exterior pintada de cor preta no alçado Sul como se pode observar na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Localização das paredes Trombe no Alçado Sul da habitação

O vão envidraçado de maior dimensão é um caso particular pois funciona como parede Trombe e como sistema de ganho directo, simultaneamente. A zona central do vão envidraçado funciona como sistema de ganho directo, no entanto, as suas extremidades laterais possuem duas parede Trombe em betão com 25cm de espessura. A Figura 4.6 ilustra a zona do vão envidraçado de maior dimensão onde se situa a parede Trombe e o sistema de ganho directo.



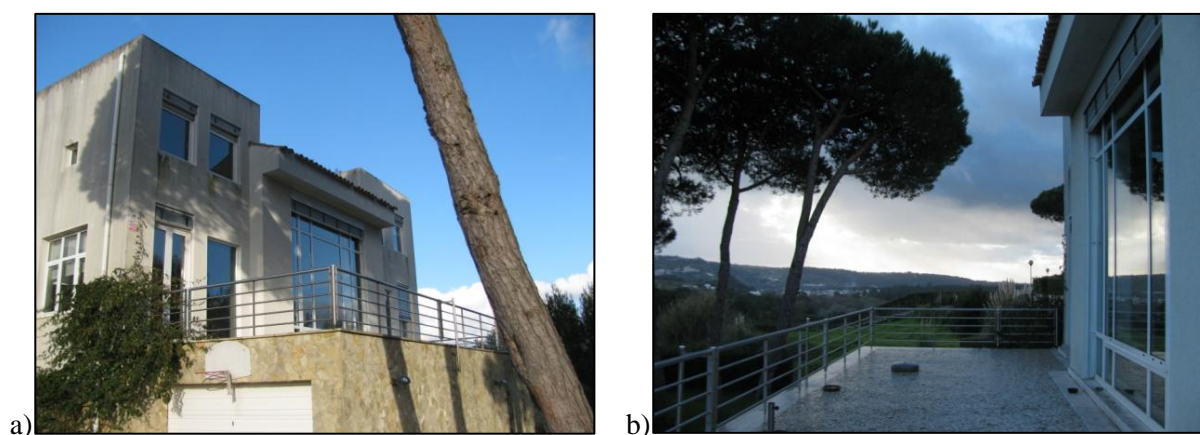
Figura 4.6 – Vista interior do vão envidraçado de maior dimensão

Através da Figura 4.7 verifica-se que as duas paredes Trombe da extremidade da habitação não possuem dispositivo de sombreamento, situação que pode condicionar o seu correcto funcionamento na estação de arrefecimento, quando é necessário baixar a temperatura no interior da habitação.



Figura 4.7 – Alçado Sul da habitação

No contacto com o proprietário, houve por parte deste a expressão e demonstração de satisfação com a contribuição das paredes Trombe para o conforto térmico no interior da habitação. No entanto, foi detectada uma irregularidade para o eficiente funcionamento e desempenho das paredes Trombe e que se deve à presença de vegetação de grande porte na zona envolvente do alçado Sul. A existência de pinheiros altos junto à fachada Sul da habitação (Figura 4.8 a) dificultam a penetração da radiação solar directa através do envidraçado e, deste modo, é colocada em causa a eficácia das paredes Trombe no período de Inverno. A Figura 4.8 b) é uma fotografia tirada no dia 31 Janeiro de 2011 por volta das 16h que é, precisamente a hora em que é exigida o máximo de radiação solar incidente no envidraçado e os pinheiros criam sombreamento no alçado Sul da habitação não permitindo, deste modo, o aquecimento da parede e posterior aquecimento do interior da casa.



**Figura 4.8 – a)Alçado Sul da casa com sombreamento devido à vegetação circundante
b)Presença de árvores de grande porte na fachada Sul da habitação**

A utilização de vegetação junto à fachada orientada a Sul pode ser efectuada desde que se recorra a árvores de folha caduca, ou seja, no Inverno a árvore não têm folhas e no Verão, quando é necessário o sombreamento, o mesmo é realizado através das folhas presentes nos ramos não permitindo, deste modo, o aquecimento da parede.

Pela Figura 4.9 a) pode observar-se como a elevada espessura da parede Trombe (35cm) diminui a área de pavimento útil de uma habitação e na Figura 4.9 b) é visível o dispositivo de sombreamento de grandes dimensões existente na parede Trombe de maior dimensão do alçado Sul.

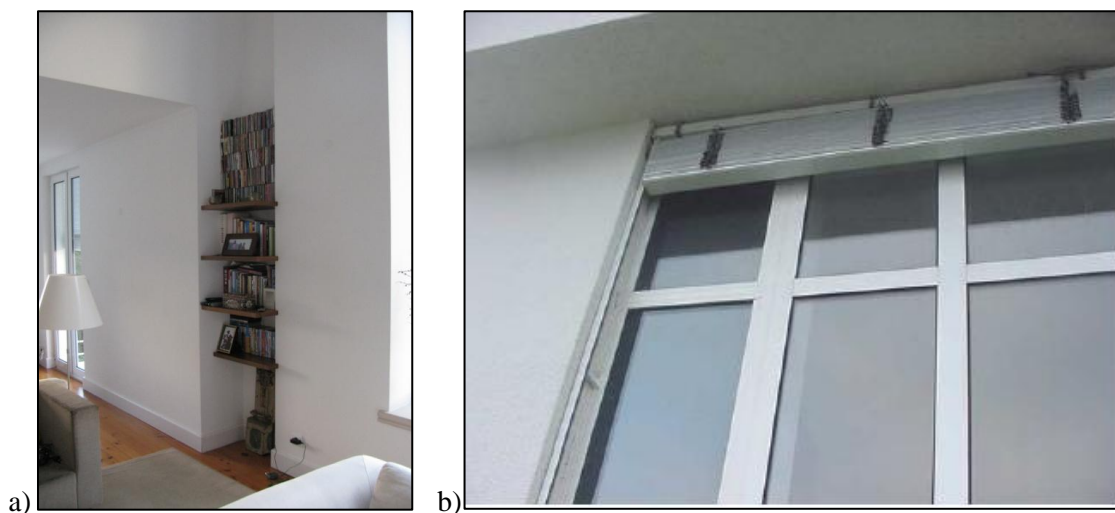


Figura 4.9 – a) Espessura da parede Trombe vista do interior da habitação

b) Dispositivo de sombreamento da parede Trombe

4.3.2 Casa Solar Passiva de Vale Rosal

Habitação: Casa Vale Rosal

Localização: Vale Rosal, Charneca da Caparica

Arquitectura: Arqº. Fausto Simões

Construção: 1986

A Casa Solar Passiva de Vale Rosal uma moradia unifamiliar com cerca de 170m² localizada a 5km da zona costeira da Caparica, na Charneca da Caparica. O edifício incorpora três sistemas solar passivos (SSP). O sistema de ganho directo e as duas principais modalidades de ganho indirecto: a estufa e a parede Trombe não ventilada (PTNV) em três linhas de aberturas solares correspondentes a três graus de privacidade ^[56].



Figura 4.10 - As três linhas de aberturas solares segundo os três graus de privacidade da Casa Solar Passiva de Vale Rosal (adaptado) ^[56]

Segundo Fausto Simões, a *estufa (sunspace)* encontra-se termicamente acoplada à sala comum e foi desenhada considerando as potencialidades termofísicas e espaciais, mas também os inconvenientes da ligação ao exterior que caracterizam as estufas. A estufa constitui a entrada principal da casa, um espaço intermédio, de passagem mas também um local de permanência quando se revela apetecível, sem nunca prejudicar o conforto da sala [56].

O sistema de ganho directo (envidraçado) é extensivamente integrado nas zonas mais utilizadas durante o dia e também nos quartos, atendendo à resposta imediata e eficiente que caracteriza este sistema solar passivo e dado que se conjuga com o aproveitamento da luz natural e o contacto com o exterior em envidraçados correntes [56].

A PTNV utilizada nesta habitação foi aplicada num compartimento de utilização nocturna, um quarto, tirando partido da inércia térmica da parede. O atraso na transmissão de calor através da parede associado ao ciclo diário da radiação solar incidente na “abertura solar”, permite situar o pico da onda de calor na face interior da parede dentro do período de utilização do quarto que é durante a noite [56]. A PTNV aproveita a radiação solar e também o calor proveniente dos gases de escape da lareira pois, estando a parede na prumada da lareira, é atravessada pela fuga (Figura 4.11).

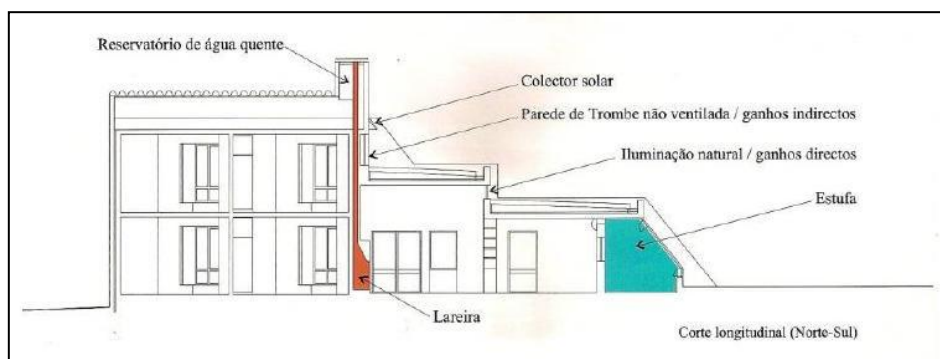


Figura 4.11 - Conjugação da parede Trombe com a fuga da lareira na Casa Solar Passiva de Vale Rosal [55]

Constituição da parede Trombe na Casa Vale Rosal [56]

A parede em questão encontra-se na fachada a Sul, tem 400 mm de espessura, 3,5m² de área e é constituída em betão. Foi aplicado uma película selectiva (Figura 4.12) com baixa emissividade (cerca de 10%) para melhorar a sua eficiência. Escolheu-se um envidraçado simples de elevada transmissividade que se encontra separado por uma caixa-de-ar de com 5 cm [56].



Figura 4.12 - Colocação da película selectiva na face exterior da Parede Trombe ^[56]

A protecção solar da parede Trombe combina a fiada de colectores solares para águas quentes sanitárias com um toldo de projectar motorizado, recolhido ao abrigo dos colectores na estação de aquecimento e aberto no resto do ano (Figura 4.13).



Figura 4.13 - Sombreamento da parede Trombe num dia de Primavera ^[56]

Comportamento térmico da parede Trombe

Realizando uma comparação entre o registo das temperaturas da sala de estar com as do quarto com parede Trombe no mesmo período de inverno, verifica-se que, o quarto tem uma maior estabilidade térmica ao longo do dia do que a sala de estar que tem maior *ganho directo* e ainda a contribuição da lareira. As temperaturas registadas na sala de estar são geralmente mais baixas durante a noite o que não acontece no quarto com parede Trombe ^[56].

Após 8 anos da obtenção dos registos da temperatura e da humidade do ar, realizou-se mais dois períodos de monitorização (Figura 4.14 e Figura 4.15): Verão de 1996 (2 a 11 de Julho) e Inverno de 1997 (21 de Fevereiro a 7 de Março). Foram efectuadas medições das temperaturas do ar na estufa, na sala de estar, num dos quartos do piso superior e no exterior ^[30].

Os resultados da estação de arrefecimento (Figura 4.14) evidenciam uma grande estabilidade nas temperaturas interiores da casa, com uma amplitude média na temperatura interior de 1,4°C (sala de estar). Nos períodos mais quentes, com temperaturas máximas exteriores na ordem dos 30°C, as temperaturas no interior não ultrapassam os 25°C. A estufa, devido à excelente protecção solar que constitui a vegetação, mantém temperaturas muito inferiores às temperaturas exteriores nos dias de maior calor, como se pode constatar na figura correspondente à monitorização de Verão ^[30].

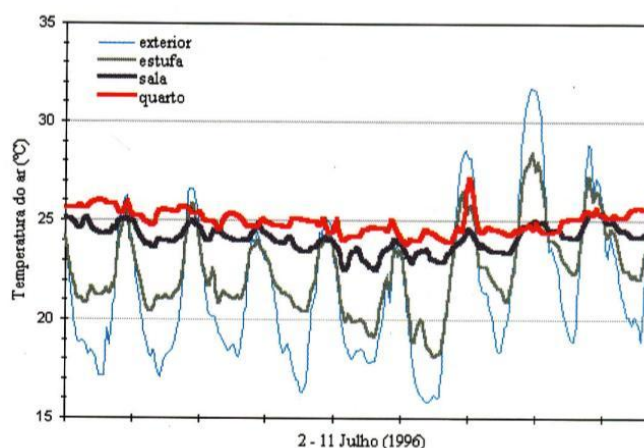


Figura 4.14 - Monitorização de 2 a 11 de Julho 1996 (Verão) ^[30]

No período de Inverno (Figura 4.15), no qual a estufa se apresenta numa situação de captação solar máxima, obtiveram-se temperaturas interiores de 22°C e uma temperatura média das mínimas de 20,5°C para valores de temperatura exterior de respectivamente 17°C e 12°C ^[30].

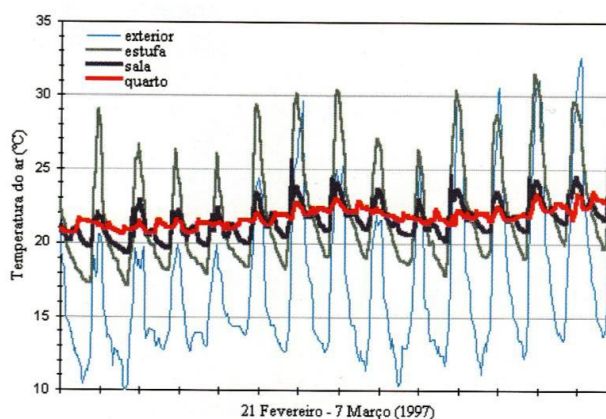


Figura 4.15 - Monitorização de 21 Fevereiro a 7 Março 1997 (Inverno) ^[30]

Este período de monitorização não corresponde, em termos de temperatura exterior, a uma sequência típica de Inverno pelo que o comportamento térmico do edifício poderá ser

diferente dos valores observados. No entanto, simulações efectuadas mostram que, para períodos de Inverno, a casa solar de Vale Rosal apresenta valores de temperatura dentro dos níveis de conforto ^[30].

4.3.3 Casa Termicamente Optimizada

Habitação: Casa Termicamente Optimizada

Localização: Ramalde – Campus do INETI, Porto

Arquitectura: Arqº. Santiago Boissel, Arqº Carlos Araújo

Construção: 1984

A casa termicamente optimizada (CTO), foi projectada e construída numa perspectiva de optimização energética. A casa possui bom isolamento térmico e sistemas solares passivos de ganho directo e ganho indirecto (paredes Trombe e colunas de água para armazenamento térmico). Como características principais, apresenta uma orientação Norte-Sul com grandes vãos envidraçados virados a Sul e duas pequenas janelas a Norte para ventilação natural (Figura 4.16 e Figura 4.17) ^[30].



Figura 4.16 - Fachada Sul da casa termicamente optimizada ^[30]

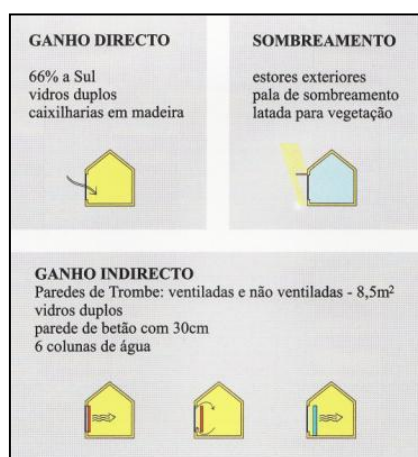


Figura 4.17 - Dados relevantes das características da CTO ^[30]

Os vãos envidraçados dispõem de estores exteriores para protecção solar e nocturna, e palas de sombreamento nos dois pisos da moradia. Estes vãos permitem que no Inverno os ganhos solares sejam muito importantes e constituam a principal fonte de aquecimento de toda a casa ^[30]. Na Figura 4.18 ilustra-se um corte vertical na CTO.

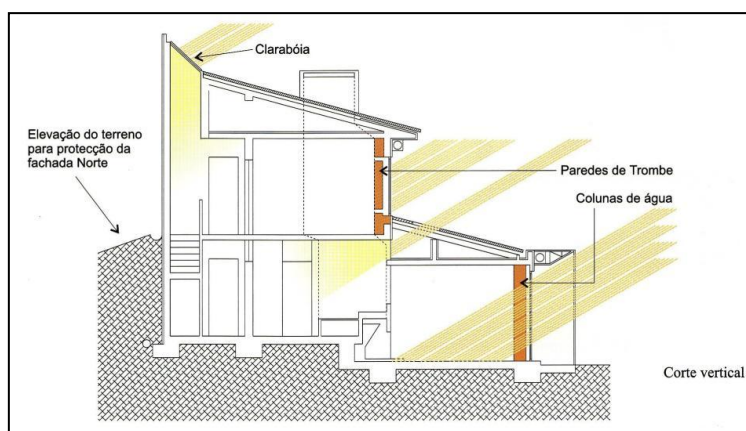


Figura 4.18 - Corte vertical da CTO ^[30]

No 2º piso foram construídas quatro paredes Trombe ventiladas, constituídas por uma parede maciça de betão de 30 cm, uma caixa-de-ar de 10 cm e vidro duplo. Estão protegidas por estores exteriores e também por uma pala estrutural que evitam ganhos solares directos numa situação de Verão ^[30].

Na estação de aquecimento e no caso da parede Trombe não ventilada, verifica-se que o “calor” atinge o interior do quarto ao fim do dia, por volta das 19h, precisamente quando a temperatura exterior diminui e se torna necessário o aquecimento. No caso da utilização da parede Trombe com ventilação, os ganhos solares são mais rapidamente insuflados no interior do espaço durante o dia, mas em contrapartida o armazenamento na parede é menor e temos menos energia disponível no período nocturno ^[30].

Na estação de arrefecimento, os vãos correspondentes às paredes Trombe estão fechados com estores exteriores. O efeito de isolamento pelo exterior da envolvente é muito importante, uma vez que impede o aquecimento da mesma. A radiação solar, ao incidir na envolvente exterior, tem maiores dificuldades em termos de condução de calor para o interior porque o primeiro material que “encontra” é isolamento e não outro ^[30].

Na situação de Inverno (Figura 4.19), verifica-se que a casa mantém uma temperatura interior (sem qualquer aquecimento) sempre superior aos 15°C ainda que a temperatura exterior ronde os 5°C.

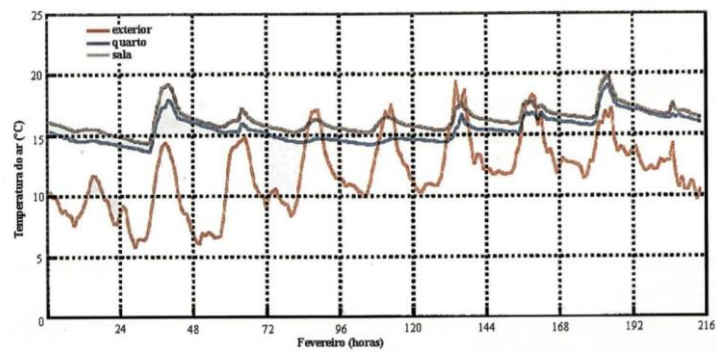


Figura 4.19 - Temperatura do ar no Inverno na CTO ^[30]

No caso da estação do Verão (Figura 4.20), verifica-se que a temperatura interior nunca ultrapassa os 25°C.

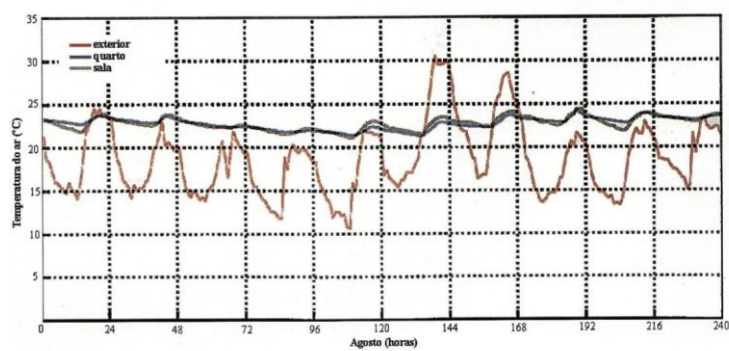


Figura 4.20 - Temperatura do ar no Verão na CTO ^[30]

5 Análise de caso de estudo

Para validação da solução de parede Trombe que tem sido descrita e caracterizada, entendeu-se ser importante poder avaliar a mesma com recurso a um programa de modelação informático – o *software EnergyPlus*.

Neste ponto da dissertação, realiza-se uma abordagem descritiva ao programa *Energy Plus* utilizado para a elaboração do trabalho procurando-se demonstrar as suas principais capacidades e os variados campos de entrada necessários preencher para a obtenção dos dados pretendidos.

5.1 O programa *Energy Plus*

O *Energy Plus* é um programa informático que possui o objectivo de auxiliar o estudo e análise do comportamento térmico dos edifícios. Este programa foi concebido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, a partir de programas já existentes, o *Blast* e o *DOE-2*, e está escrito em linguagem *Fortran 90* ^{[62],[3]}. No presente trabalho foi utilizada a versão 5.0.0.031 (Setembro de 2010) ^[62].

Através do *Energy Plus* consegue-se obter, após simulação, o comportamento térmico de uma determinada zona de um edifício a partir de dados inseridos pelo utilizador – como a geometria, materiais da envolvente, sistemas e regimes de climatização -, com recurso a um ficheiro de dados climáticos do local de implantação. Este programa, permite ainda, definir os sistemas e regimes de climatização para se obter, posteriormente, as necessidades energéticas associadas às temperaturas interiores pretendidas em cada zona do edifício.

O *Energy Plus* possui diversas capacidades que o tornam bastante útil como o sistema modular que permite definir várias zonas e, de forma diferenciada, a infiltração ou os ganhos internos para cada zona. O *software* oferece também a possibilidade de fornecer os dados resultantes das simulações em intervalos de tempo (*Timestep*) máximos de uma hora, no entanto, o utilizador pode optar por intervalos mais reduzidos ^[32].

Quando o programa é iniciado, o utilizador visualiza o arquivo de entrada, no qual se procede à introdução de todos os dados necessários à correcta modelação do edifício a estudar. O *software* possui um editor de texto, em formato IDF (*Input Data File*), onde o utilizador coloca toda a informação necessária para uma correcta caracterização do edifício que vai ser posteriormente analisado.

O *Energy Plus* é uma ferramenta de estudo de comportamento térmico de edifícios com base em análise dinâmica. Esta análise permite ao usuário elaborar simulações de grande

complexidade com base num elevado número de variáveis, obtendo-se resultados mais rigorosos e mais próximos da realidade.

Relativamente aos arquivos de saída de resultados o programa apresenta, sempre que é realizada uma simulação, um ficheiro de erros para que o utilizador proceda à sua rápida detecção e correcção. Existe a possibilidade do utilizador visualizar o edifício através de um ficheiro em formato CAD com a geometria modelada ^[32].

No presente caso de estudo consideraram-se os dados de entrada e de saída apresentados na Figura 5.1.

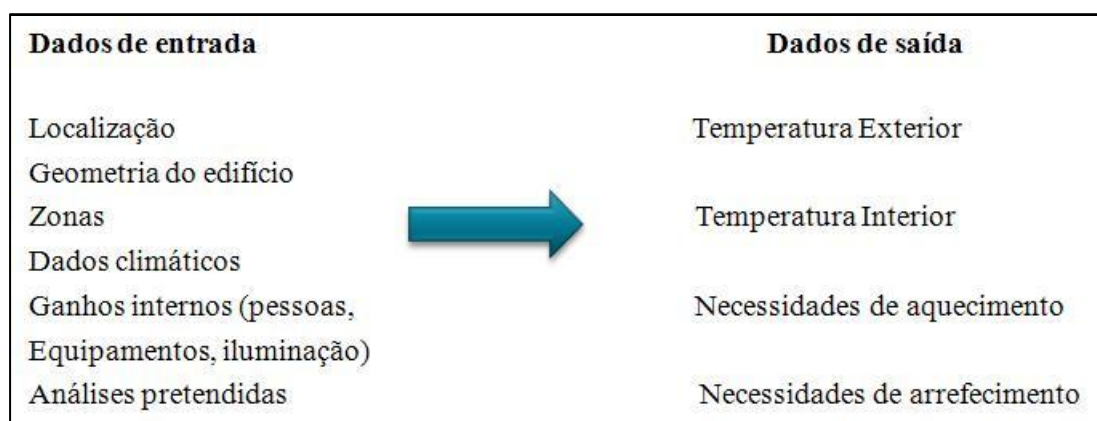


Figura 5.1 – Arquivos de entrada e saída do programa *EnergyPlus*

Existe, ainda, uma ferramenta de contínua utilização do programa é o *EP-Launch*, onde são introduzidos os ficheiros climáticos e verificada a existência de erros após simulação. Terminada a simulação o programa fornece um ficheiro informando os possíveis erros que possam ter ocorrido, gravidade dos mesmos e em que item do programa foi detectado.

5.2 Metodologia utilizada para definição do problema em estudo

5.2.1 Parede Trombe no *EnergyPlus*

O algoritmo de cálculo referente ao caso particular da parede Trombe é utilizado para o modelo “*Trombe wall zone*” presente no programa, como por exemplo, um espaço de ar entre uma parede de armazenamento e um vidro exterior. O algoritmo é idêntico ao modelo de convecção (baseado na norma ISO 15099) utilizada no *Windows5* para convecção entre as camadas de vidros em sistemas de envidraçados múltiplos. A utilização deste algoritmo para modelação de “paredes Trombe não ventiladas” foi validada após estudos realizados por Peter Ellis da *University of Illinois, USA* em 2003 ^[26].

Este algoritmo fornece coeficientes de convecção para um elemento vertical que está selado e sem ventilação. O algoritmo é aplicado no espaço de ar existente entre o vidro duplo do envidraçado ou no espaço de ar entre o vidro exterior e a superfície interior da parede. Estes coeficientes de convecção são a única diferença entre uma zona normal (*normal zone*) e uma zona de parede Trombe (“*Trombe zone*”) [26].

Para um elemento vertical com espaço de ar, a correlação presente na ISO 15099 é a seguinte:

$$\begin{aligned}
 Nu1 &= 0,0673838Ra^{1/3} & \text{para } 5E4 < Ra < 1E6 \\
 Nu1 &= 0,028154Ra^{0,4134} & \text{para } 1E4 < Ra < 5E4 \\
 Nu1 &= 1 + 1,7596678E - 10Ra^{2,2984755} & \text{para } Ra \leq 1E4 \\
 Nu2 &= 0,242 \left(\frac{Ra}{A} \right)^{0,272} \\
 Nu &= \max(Nu1, Nu2)
 \end{aligned} \tag{13}$$

Sendo:

Nu – número de Nusselt

Ra – número de Rayleigh

A - relação altura/largura do elemento vertical

O coeficiente de convecção do envidraçado para a parede expressa-se da seguinte forma:

$$h_{net} = k \left(\frac{Nu}{L} \right) \tag{14}$$

Sendo:

k - condutibilidade do ar (W/m.°C)

L - espessura do espaço de ar (m)

O coeficiente de convecção aplicado separadamente a cada parede e utilizado no balanço térmico da zona é:

$$h_c = 2.h_{net} \tag{15}$$

Parede Trombe não ventilada no *EnergyPlus*

A superfície exterior da parede Trombe contém um envidraçado simples ou duplo. O envidraçado deve, idealmente, cobrir toda a área de parede e possuir elevada transmissividade para que a parede Trombe seja atingida pela máxima quantidade de fluxo solar. A parede interior é, normalmente, de elevada espessura e tem uma superfície de absorção solar. Esta superfície é revestida por um material selectivo com alto coeficiente de absorção solar e, idealmente, deverá ser de cor escura ^[26].

É importante certificar que o item *Solar Distribution* no campo *Building* é definido por *FullInteriorAndExterior* para que a maioria do fluxo solar seja direccionado para a superfície de absorção da parede Trombe ^[26]. No item *Zone Inside Convection Algorithm* presente no campo *Thermal Zone* é necessário introduzir “*TrombeWall*” para que o programa recorra ao algoritmo correspondente à parede Trombe referenciado anteriormente.

5.2.2 Edifício

O caso de estudo consiste na simulação de uma célula teste com três soluções construtivas na parede Sul da mesma (ver Anexo I):

- Uma parede Trombe com uma pala de sombreamento – Sistema solar de ganho indirecto
- Uma parede dupla com um envidraçado – Sistema solar de ganho directo
- Uma parede dupla

A célula teste estudada está dividida em duas zonas (ver Figura 5.2). A zona 1 tem 28m² de área, 2,6m de pé direito, possui dois envidraçados e é considerada um “espaço útil⁸”. A zona 2 é o local onde vão ser inseridas as três soluções construtivas (parede Trombe, envidraçado e parede dupla) na parede orientada a Sul. Foi introduzida uma pala de sombreamento na parede Sul da célula teste no caso da simulação para a solução de parede Trombe. (ver Anexo I)

⁸ Espaço útil é o espaço correspondente à área útil de pavimento. ^[2]

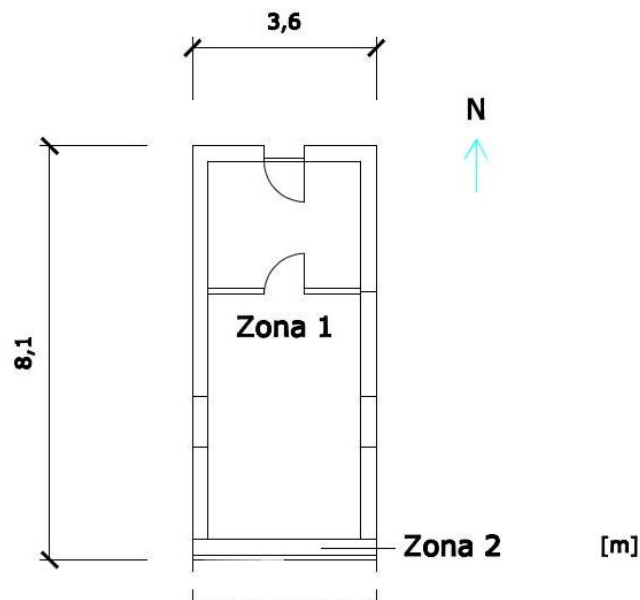


Figura 5.2 – Planta do edifício para o caso da utilização da parede Trombe

Na Figura 5.3 ilustram-se os alçados da célula teste para a simulação efectuada no caso de parede Trombe

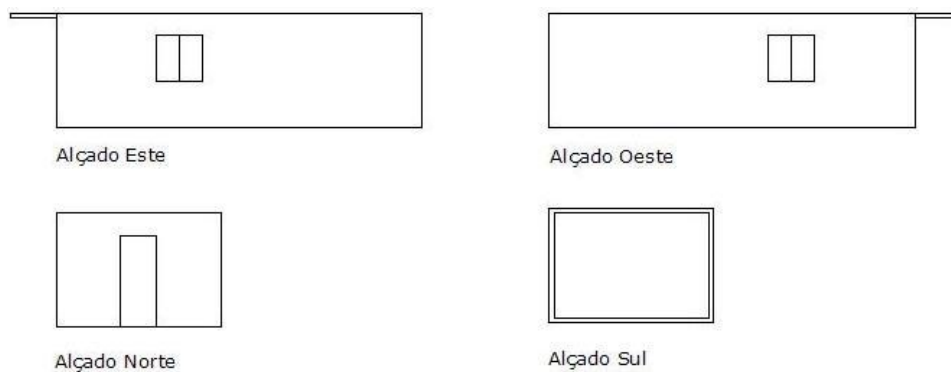


Figura 5.3 - Alçados da célula teste para o caso da parede de Trombe

5.2.3 Parâmetros de simulação (*Simulation Parameters*)

Neste campo são introduzidos os dados principais necessários para a definição do edifício em estudo. Os exemplos dos parâmetros a inserir pelo utilizador são a versão do programa que está a usar (versão 5.0.0.031), a variância da posição solar, os algoritmos de transferência de calor pela envolvente e os algoritmos de convecção interior e exterior nas diversas superfícies que compõem o edifício. O algoritmo de transferência de calor considerado para a envolvente do edifício foi o *ConductionTransferFunction*, que considera apenas o calor sensível. A escolha deste item deve-se ao facto de se pretender considerar, para

efeitos de simulação, apenas a ocorrência de fenómenos de transmissão de calor por condução, desprezando o armazenamento de humidade nos elementos construtivos ^[34].

No campo *Simulation Parameters* é necessário introduzir dados referentes ao sombreamento do edifício, localização do edifício, à utilidade que o item *Timestep* apresenta numa análise do comportamento diário do edificado e as tolerâncias de convergência quer de temperaturas quer de cargas, a distribuição solar e o número máximo de dias de teste para a verificação das ditas convergências.

Relativamente ao sombreamento do edifício, considerou-se que as mudanças significativas da posição sol ocorreriam de 20 em 20 dias. Neste campo destaca-se o item *Building* onde é introduzida a orientação do edifício relativamente ao Norte, a zona de implantação em que se encontra inserido (considerou-se cidade) e a distribuição solar.

No item *Timestep*, o utilizador consegue definir um intervalo de tempo de simulação inferior a uma hora, permitindo deste modo obter resultados mais pormenorizados ao longo do dia. O programa apenas permite a introdução de valores de *Timestep* que sejam divisíveis por 60 e o valor utilizado neste estudo foi quatro. Deste modo, a análise comportamental do edifício é realizada de 15 em 15 minutos.

Relativamente ao preenchimento do item distribuição solar (*Solar Distribution*) considerou-se *FullInteriorAndExterior* para a simulação com a parede Trombe (justificado anteriormente). Considerou-se, também, *FullInteriorAndExterior* nas simulações com as outras soluções construtivas porque a geometria da célula teste é convexa ^[34].

5.2.4 Localização e Clima (*Location and Climate*)

No campo *Location and Climate* são introduzidos dados referentes à localização do edifício, tais como a latitude, longitude, elevação e fuso horário relativamente ao *GMT*. Caso não sejam conhecidos os dados climáticos do local de implementação do edifício é possível obtê-los através do programa *EnergyPlus*.

No caso de estudo, foram feitas simulações para duas localidades distintas do país (Lisboa- zona I1,V2 e Guimarães – zona I2,V2) baseadas nas zonas definidas pelo RCCTE, onde é referido que Portugal está dividido em três zonas climáticas de Inverno, I1, I2 e I3, tal como se pode observar na Figura 5.4.

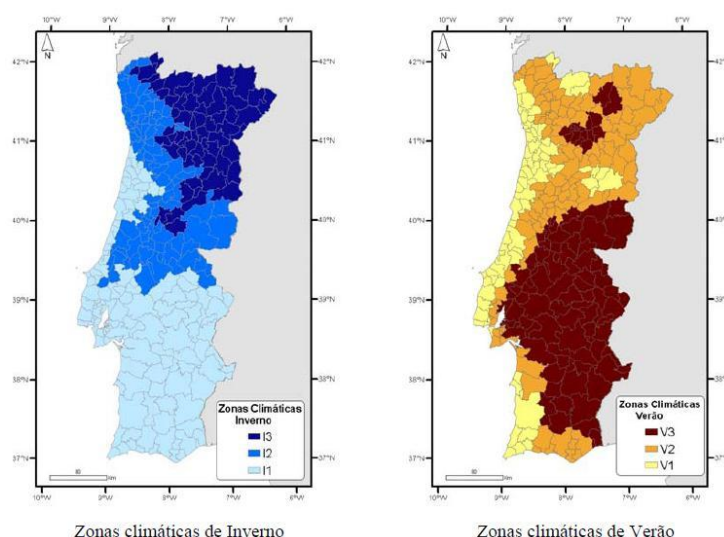


Figura 5.4 – Zonamento climático de Inverno e Verão [2]

Neste campo, além da localização e dados climáticos, também se introduz o período de simulação (*Run Period*), onde são inseridos o dia e mês de início e fim da simulação pretendida. No presente caso de estudo realizou-se períodos de simulação sempre com a duração de 1 ano.

Dado que o edifício em estudo se encontra em contacto com o terreno, há que introduzir a temperatura média do solo para as zonas de simulação do programa. Recorreu-se ao ficheiro *EP-Launch*, no separador *Utilities* escolheu-se o item *Slab* para a determinação das temperaturas médias do terreno nos diferentes meses do ano para as cidades de Lisboa e Guimarães.

5.2.5 Horários (*Schedules*)

Neste campo é definido um determinado número de horários (*Schedules*), essenciais ao funcionamento de outros campos do programa e das simulações que se pretende efectuar. O grupo *Schedule* define o grau de utilização, operação e equipamentos do edifício (iluminação, controlo de temperatura, actividade e densidade ocupacional).

No campo de *Schedule:Compact* (Figura 5.5) são colocados todos os *Schedules* que são acedidos num único comando tornando mais fácil e rápida a introdução de dados e posterior consulta dos mesmos. No entanto, para que este campo funcione, é necessário estabelecer uma ligação com o *ScheduleTypeLimits*. Neste campo são estabelecidos os limites máximos e mínimos dos valores existentes no *Schedule:Compact* e é indicado se as variáveis são consideradas discretas ou contínuas.

No caso de estudo, foi introduzida uma persiana na parede Trombe considerando-se totalmente fechada no Verão para evitar sobreaquecimento. Na estação de Inverno considerou-se o dispositivo de sombreamento (persianas) aberto durante os períodos de radiação solar para obter maiores ganhos solares. De seguida apresentam-se vários quadros com os horários de funcionamento das persianas para as simulações efectuadas em Lisboa e Guimarães:

Quadro 5.1 - Funcionamento das persianas para a célula teste em Lisboa

	1 Janeiro - 30 Abril	1 Maio - 30 Outubro	1 Novembro - 31 Dezembro
0h00 – 9h00	Activa (encerrada)	Activa (encerrada)	Activa (encerrada)
9h00 – 20h00	Inactiva (aberta)	Activa (encerrada)	Inactiva (aberta)
20h00 – 24h00	Activa (encerrada)	Activa (encerrada)	Activa (encerrada)

Quadro 5.2 – Funcionamento das persianas para a célula teste em Guimarães

	1 Janeiro - 31 Maio	1 Junho - 30 Setembro	1 Outubro - 31 Dezembro
0h00 – 9h00	Activa (encerrada)	Activa (encerrada)	Activa (encerrada)
9h00 – 20h00	Inactiva (aberta)	Activa (encerrada)	Inactiva (aberta)
20h00 – 24h00	Activa (encerrada)	Activa (encerrada)	Activa (encerrada)

Quadro 5.3 - Funcionamento da persiana inserida na parede Trombe para a célula teste em Lisboa

	1 Janeiro - 30 Abril	1 Maio - 30 Outubro	1 Novembro - 31 Dezembro
0h00 – 24h00	Inactiva (aberta)	Activa (encerrada)	Inactiva (aberta)

Quadro 5.4 - Funcionamento da persiana inserida na parede Trombe para a célula teste em Guimarães

	1 Janeiro - 31 Maio	1 Junho - 30 Setembro	1 Outubro - 31 Dezembro
0h00 – 24h00	Inactiva (aberta)	Activa (encerrada)	Inactiva (aberta)

[0009] Schedule:Compact									
[0013] Material									
[0001] Material.NoMass									
[0002] Material.AirGap									
[0002] WindowMaterial:Glazing									
[0001] WindowMaterial:Gas									
[0001] WindowMaterial:Shade									
[0009] Construction									
[0001] GlobalGeometryRules									
[0003] Zone									
[0018] BuildingSurface:Detailed									
[0004] FenestrationSurface:Detailed									
[0001] WindowProperty:ShadingControl									
[0002] WindowProperty:FrameAndDivider									
[0001] ShadingZone:Detailed									
[0001] People									
[0001] Lights									
[0001] ElectricEquipment									
[0002] ZoneInfiltration:DesignFlowRate									
[0001] ZoneControl:Thermostat									

Explanation of Keyword	
Irregular object. Does not follow the usual definition for fields. Fields A3... are:	
Through: Date	
For: Applicable days (ref: Schedule:Week:Compact)	
Interpolate: Yes/No (ref: Schedule:Day:Interval) -- optional, if not used will be "No"	
Unit: <Time> (ref: Schedule:Day:Interval)	
<numeric value>	
words "Through","For","Interpolate","Unit" must be included.	
ID: A1	Enter a alphanumeric value

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		Limite temp max	Limite Temp min	Control Temp	Activ Persianas SCI	Presença Pessoas	Actividade Pessoas	Funcio Iluminação	Funcio Equ
Schedule Type Limits Name		Temperatura	Temperatura	Temperatura	FRACÇÃO	FRACÇÃO	Actividade	FRACÇÃO	FRACÇÃO
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 4/30	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: alldays	For: alldays	For: alldays	For: alldays	For: alldays	For: alldays	For: alldays	For: alldays
Field 3	varies	Unit: 24:00	Unit: 24:00	Unit: 24:00	Unit: 9:00	Unit: 9:00	Unit: 9:00	Unit: 22:00	Unit: 22:00
Field 4	varies	25	20	4	1	1	72	0	0
Field 5	varies				Unit: 20:00	Unit: 22:00	Unit: 22:00	Unit: 23:00	Unit: 23:00
Field 6	varies				0	0	0	1	1
Field 7	varies				Unit: 24:00	Unit: 24:00	Unit: 24:00	Unit: 24:00	Unit: 24:00
Field 8	varies				1	1	72	0	0
Field 9	varies				Through: 9/30				

Figura 5.5 – Definição dos horários (*schedules*) no *Energy Plus*.

5.2.6 Elementos de construção (*Surface Construction Elements*)

Neste campo são introduzidos os materiais e as soluções construtivas existentes em toda a envolvente exterior e interior da célula teste. Na definição dos elementos construtivos, é necessário ter atenção à forma como são introduzidos os dados, visto que têm de ser introduzidos do exterior para o interior.

Neste campo são introduzidos dados referentes à caracterização dos materiais constituintes das envolventes: espessura, grau de rugosidade, condutibilidade térmica, densidade, calor específico e as absorções térmica, solar e visível. Relativamente à definição das características do ar, apenas implica a colocação do valor da sua resistência. As características dos materiais foram obtidas com auxílio do ITE 50 ^[53].

Para a simulação com a parede Trombe considerou-se a mesma com 8m² de área porque foi a solução que melhores resultados obteve relativamente às necessidades energéticas anuais após simulação no *EnergyPlus*. Foram efectuadas mais simulações com paredes Trombe de menores áreas (6m² e 4,8m²) e apesar de se ter obtido menores necessidades de arrefecimento (N_{vc}), as necessidades de aquecimento (N_{ic}) foram consideravelmente superiores não compensando a sua adopção.

Para a simulação com a parede dupla com envidraçado considerou-se o envidraçado com 4,8 m². Foram efectuadas simulações para envidraçados com 3m² e 8m², no entanto, a área de 4,8 m² foi a área que melhores resultados obteve relativamente às necessidades energéticas anuais após simulação no *EnergyPlus*. A solução de parede dupla adoptada foi considerada sem caixa-de-ar.

Nos quadros seguintes apresenta-se a constituição das três soluções simuladas na parede Sul da célula teste e que foram introduzidas no *EnergyPlus*:

Quadro 5.5 – Solução construtiva da parede Trombe

Solução construtiva – Parede Trombe	Espessura
Envidraçado Simples	4 mm
Caixa-de-ar	10 cm
Película selectiva	0,16 cm
Betão	30 cm
Reboco	1,5 cm

Quadro 5.6 – Solução construtiva da parede dupla com envidraçado

Solução construtiva – Parede dupla com envidraçado	Espessura
Envidraçado duplo	6mm + 4 mm
Reboco	1,5 cm
Tijolo	11 cm
Isolamento térmico - EPS	5 cm
Tijolo	11 cm
Reboco	1,5 cm

Quadro 5.7 – Solução construtiva da parede dupla

Solução construtiva – Parede dupla	Espessura
Reboco	1,5 cm
Tijolo	11 cm
Isolamento térmico - EPS	5 cm
Tijolo	11 cm
Reboco	1,5 cm

As restantes paredes exteriores da célula teste são paredes duplas sem caixa-de-ar compostas por: reboco (1,5cm), tijolo (11cm), EPS (5cm), tijolo (11cm) e reboco (1,5cm).

A cobertura do edifício é definida por reboco (1,5cm), betão (30cm), EPS (5cm), impermeabilização (1cm) e lajetas de betão (5cm).

O pavimento inferior do edifício é definido por enrocamento (10cm), geotêxtil (0,2cm), massame armado (10cm), betonilha de regularização (4cm) e um revestimento (ladrilhos).

Os dados a introduzir sobre os envidraçados baseiam-se no seu poder de transmitir, reflectir e emitir a radiação que nele incide e na sua condutibilidade térmica. Outra indicação

que o utilizador terá de definir está relacionada com a difusão solar da radiação incidente. Se o utilizador optar por ^[34]:

- “No”, o vidro é assumido como transparente, sem difusão da radiação transmitida.
- “Yes”, o programa considera o vidro translúcido, com difusão da radiação incidente.

Neste caso a opção tomada foi “No”, visto que se considerou que a célula teste tem vidros transparentes.

5.2.7 Zonas térmicas e superfícies (*Thermal Zones and Surfaces*)

O *EnergyPlus* define Zona como um conjunto de espaços que se encontram submetidos ao mesmo controlo térmico. O programa reconhece as zonas definidas através do preenchimento do item *Zone* e indicando posteriormente no item *BuildingSurface:Detailed*, quando se elabora a geometria do edifício.

Para o caso da aplicação da parede Trombe foi preenchido o item *Zone Inside Convection Algorithm* com *TrombeWall* para que o programa considere o algoritmo definido para o caso particular de parede Trombe. A elaboração da geometria do edifício obedece a alguns critérios e sabendo que a mesma é definida através de coordenadas cartesianas foi necessário estabelecer o primeiro vértice e o sentido de orientação dos restantes.

No presente caso de estudo considerou-se como primeiro vértice o canto inferior esquerdo e os vértices seguintes foram determinados a partir do primeiro, seguindo o sentido contrário ao dos ponteiros do relógio.

No item *BuildingSurface:Detailed* é definido a geometria do edifício, a zona a que pertencem as soluções construtivas adoptadas e previamente definidas no item *Construction*, as condições adjacentes à parede e ainda a sua exposição ao Sol e ao vento.

5.2.8 Ganhos internos (*Internal Gains*)

Os ganhos internos de uma determinada zona podem ser considerados, neste programa, como sendo devidos a diversas fontes, como a iluminação, o equipamento e a ocupação humana presentes nessa mesma zona.

Os ganhos internos referentes à ocupação humana devem-se essencialmente à energia consumida na elaboração das respectivas actividades ao longo do dia. Deste modo, recorreu-se a um horário (*Schedule*) de forma a indicar as horas em que as pessoas se encontram no

interior da célula teste e a elaborar as suas actividades. Os ganhos internos considerados neste estudo apresentam-se no Quadro 5.8.

Quadro 5.8 - Ganhos Internos durante todo o ano

Horas	Actividades	Número de Habitantes	Consumo Equipamentos [W/m ²]	Consumo iluminação médio [W/m ²]
00h00 – 09h00	Dormir	2	-	-
09h00 – 21h00	-	-	-	-
21h00 – 22h00	Relaxar sentado	2	10	15
22h00 – 23h00	Ler	2	10	15
23h00 – 24h00	Dormir	2	-	-

A simulação através do *EnergyPlus* é realizada com uma parede Trombe não ventilada e sendo esta, uma solução aconselhável para espaços de ocupação nocturna, considera-se que a divisão em estudo se trata de um quarto.

5.2.9 Controlo de aquecimento e arrefecimento (*Zone HVAC Controls and Thermostats*)

No programa *EnergyPlus* define-se, para cada zona, o controlo térmico pretendido, podendo este ser caracterizado em três situações diferentes. Na primeira situação (situação de Inverno), o programa aquece a zona quando a temperatura baixa de um determinado valor. Na segunda situação apenas arrefece a zona quando a temperatura ultrapassa um valor fixo (situação de Verão). A terceira situação executa as duas situações anteriores em forma alternada, mantendo desta forma o controlo de temperatura no interior.

No grupo de controlo de temperatura dos sistemas AVAC foram definidos os valores de temperatura que se pretendem que a célula teste assuma ao longo do ano. Para efeitos de análise de comportamento térmico de Inverno e de Verão foram consideradas as temperaturas de 20°C e 25°C, respectivamente.

Para que a temperatura se mantenha nos intervalos de temperatura definidos é necessário o funcionamento de equipamentos nas zonas em que se pretende esse controlo de temperatura. Para definir os equipamentos a utilizar nas zonas onde se pretende controlar a temperatura são introduzidos os dados no campo *Zone HVAC Forced Air Units* que é desenvolvido no ponto seguinte.

A definição dos limites máximos e mínimos das temperaturas no interior das zonas é conseguida com recurso ao campo *Schedules*, já referido anteriormente.

5.2.10 Definição de equipamentos AVAC (*Zone HVAC Forced Air Units*)

Neste campo preencheu-se o item *ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem* que define alguns parâmetros dos equipamentos utilizados para aquecimento e arrefecimento da zona 1 da célula teste.

Os equipamentos inseridos em cada zona correspondem a um sistema virtual, ou seja, um sistema 100% eficiente, sem ganhos internos, permitindo ainda manter a temperatura no intervalo desejado (de 20°C a 25°C). Deste modo, este sistema permite adicionar e retirar carga térmica conforme as necessidades do edifício [3].

Considerou-se uma taxa de renovação de ar nos $0,6h^{-1}$ e preencheu-se o item de *NoOutdoorAir* para que o funcionamento dos equipamentos de climatização não afecte a taxa de renovação definida.

Ainda existem outros parâmetros que são necessários definir neste campo, como a temperatura e humidade do ar fornecido para o efeitos de aquecimento e/ou arrefecimento (Figura 5.6).

Field	Units	Obj1
Name		Equip Fict 2
Zone Supply Air Node Name		N01
Heating Supply Air Temperature	C	50
Cooling Supply Air Temperature	C	15
Heating Supply Air Humidity Ratio	kg-H2O/kg-air	0,02
Cooling Supply Air Humidity Ratio	kg-H2O/kg-air	0,01
Heating Limit		NoLimit
Maximum Heating Air Flow Rate	m3/s	autosize
Cooling Limit		NoLimit
Maximum Cooling Air Flow Rate	m3/s	autosize
Outdoor Air		NoOutdoorAir
Outdoor Air Flow Rate	m3/s	autosize
Heating Availability Schedule Name		
Cooling Availability Schedule Name		

Figura 5.6 - Definição do equipamento virtual

5.2.11 Ligação de Equipamentos AVAC (*Zone HVAC Equipment Connection*)

Este campo está directamente ligado com o campo visto que é neste local que o utilizador define os equipamentos fictícios a colocar nas diferentes zonas em que se pretende o conforto e controlo de temperatura.

No campo *ZoneHVAC:EquipmentList* foi definido o equipamentos virtual.

No campo *ZoneHVAC:EquipmentConnections* foram definidos os nós de entrada e saída de ar de forma a construir um ciclo na zona-HVAC.

5.2.12 Relatórios (*Reports*)

O campo *Reports* é a ultima secção do programa e permite seleccionar todas as variáveis cujos resultados se pretende analisar.

Neste campo são definidos os resultados que se pretendem que o *Energy Plus* apresente sob forma de “output”. Este *software* pode fornecer uma vasta lista de resultados e o utilizador é que escolhe quais as variáveis que pretende com recurso ao campo *Output:Variable*, no qual se define a frequência dos valores solicitados. Neste caso, foram solicitadas variáveis de temperaturas exterior e interior para elaboração de gráficos relativos ao comportamento térmico do edifício. Estas variáveis são definidas *Outdoor Dry Bulb* e *Zone Mean Air Temperature*, respectivamente.

Além das variáveis atrás referidas, foram solicitadas ainda *Ideal Loads Air Heating Energy* e *Ideal Loads Air Total Cooling Energy* que correspondem às necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, respectivamente.

5.3 Análise do comportamento térmico da célula teste

Neste ponto procede-se à apresentação dos resultados obtidos através da modelação com base programa *Energy Plus*. Após simulação no programa *Energy Plus*, os dados foram transferidos para o *Microsoft Excel* recorrendo ao programa *Open Office* para se realizarem os gráficos da análise térmica da célula teste.

Realiza-se uma análise do comportamento do edifício através da temperatura interior da célula teste e das necessidades energéticas ao longo de um ano para as três soluções construtivas na parede de orientação Sul (parede Trombe não ventilada, uma parede dupla com envidraçado, uma parede dupla).

5.3.1 Célula teste localizada em Lisboa

5.3.1.1 Análise da variação da temperatura interior da célula teste

Para a célula teste situada em Lisboa apresentam-se os valores da temperatura exterior e temperatura interior para as três soluções construtivas sem o recurso a equipamentos para obtenção de conforto (Figura 5.7).

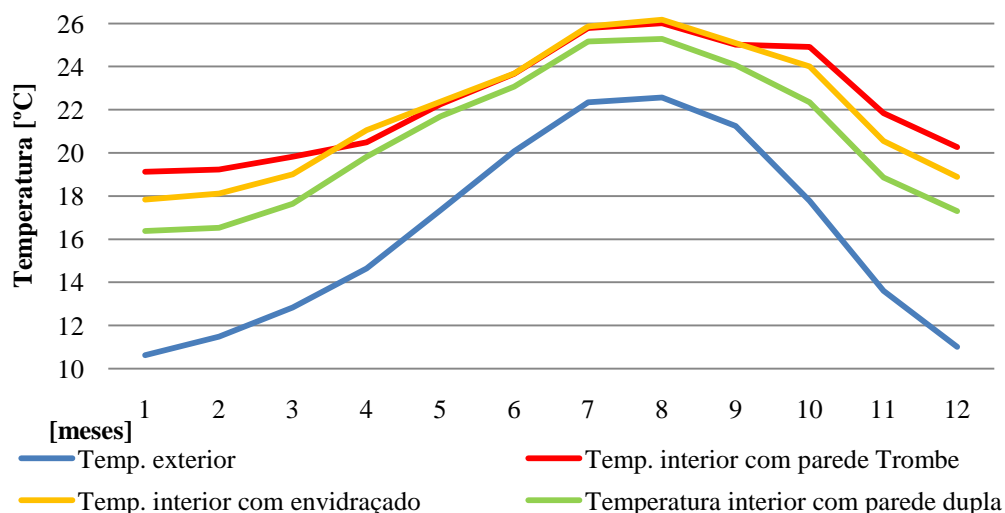


Figura 5.7 – Temperatura média mensal (célula teste em Lisboa)

Analisando o gráfico da Figura 5.7 verifica-se que a temperatura média mensal da solução “parede Trombe” é a que mais se aproxima dos valores de conforto (20°C e 25°C) nos meses pertencentes à estação de aquecimento. No mês de Janeiro verifica-se uma diferença considerável das temperaturas médias mensais entre as três soluções na medida em que a “parede Trombe” é 19,1°C, a solução “envidraçado” 17,8°C e a “parede dupla” é 16,3°C. Na estação de arrefecimento a solução que mais se aproxima dos valores de conforto é a “parede dupla”, no entanto a diferença das temperaturas interiores das três soluções não é tão significativa comparando com os valores da estação de aquecimento.

Para melhor entendimento do comportamento térmico da célula teste no Inverno e Verão separadamente, apresenta-se no gráfico da Figura 5.8 a evolução da temperatura interior ao longo de 24 horas para o dia mais frio da estação de aquecimento (31 de Janeiro) e na Figura 5.9 para o dia mais quente da estação de arrefecimento (15 Julho).

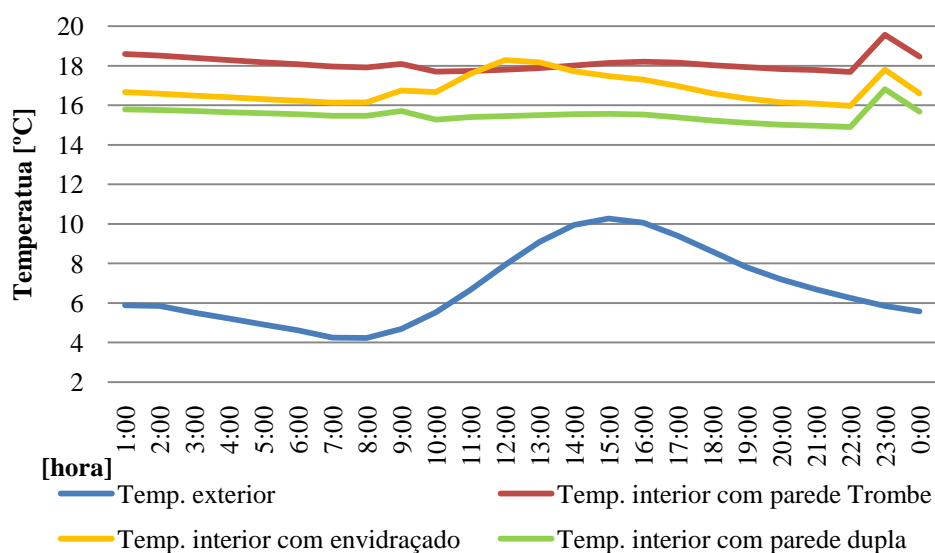


Figura 5.8 - Evolução da temperatura interior no dia 31 de Janeiro

Através do gráfico da Figura 5.8 observa-se que a partir das 9h, quando as persianas da solução “envidraçado” são abertas, a temperatura interior da célula teste começa a subir e ultrapassa a temperatura interior da solução de “parede Trombe” por volta das 12 horas. Nas horas seguintes, com a diminuição da radiação solar e temperatura exterior, a temperatura interior da solução “envidraçado” desce distanciando-se da temperatura da solução de “parede Trombe”. Assim, verifica-se que a solução de “parede Trombe” mantém a temperatura mais elevada e estável ao longo do dia minimizando a oscilação de temperatura no interior da célula teste. Ao fim do dia, por volta das 23h é visível o contributo que os ganhos internos fornecem para o aumento da temperatura interior através das actividades desenvolvidas pelos ocupantes, funcionamento dos equipamentos e iluminação.

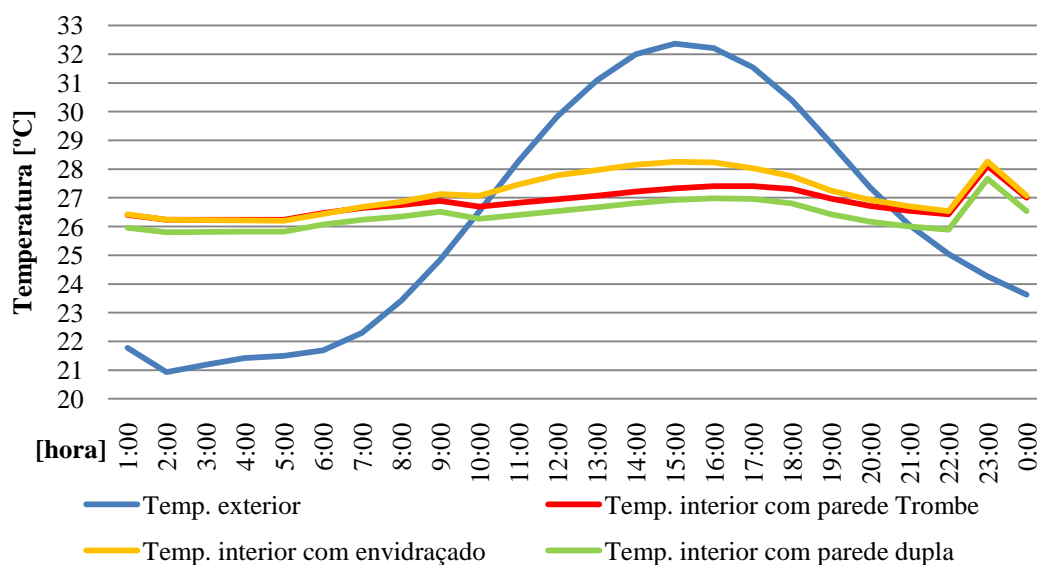


Figura 5.9 - Evolução da temperatura interior no dia 15 de Julho

Verifica-se, através do gráfico da Figura 5.9 que a melhor solução é a “parede dupla”, visto que se consegue obter valores de temperatura interiores mais próximos do desejado (25°C) na estação de arrefecimento. Os valores de temperatura interiores para a solução “envidraçado” são os valores mais elevados nas horas de mais calor e quando a temperatura exterior se encontra mais alta, chega a atingir 28,2°C.

Ao final do dia, a partir das 22h, é visível que os ganhos internos se tornam indesejados e fazem aumentar a temperatura interior da célula teste num dia pertencente à estação de arrefecimento quando se pretende obter valores abaixo dos 25°C.

Não são atingidos valores superiores de temperaturas interiores nas horas de maior radiação solar porque o dispositivo de sombreamento (persianas) se encontra encerrado na estação de Verão.

5.3.1.2 Análise das necessidades energéticas da célula teste

Neste ponto foram calculadas as necessidades nominais de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) para manter a temperatura interior da célula teste entre os 20°C e 25°C, através de um equipamento, durante um ano para as três diferentes soluções construtivas inseridas na parede Sul (Figura 5.10 e Quadro 5.9).

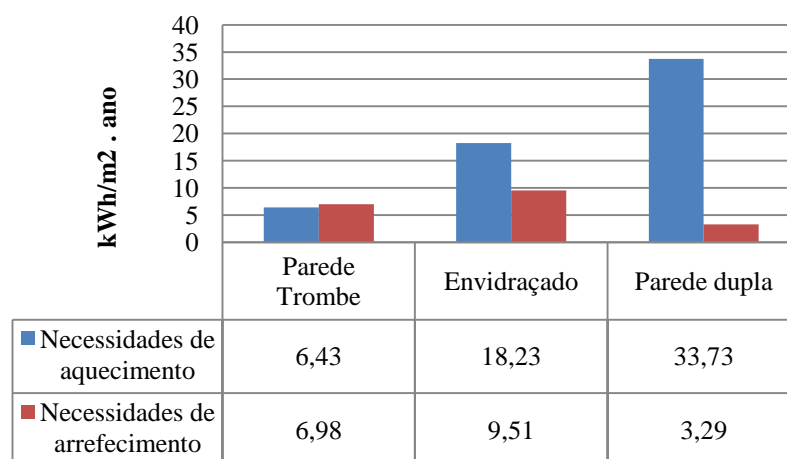


Figura 5.10 – Necessidade nominal de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) para as três soluções construtivas na fachada Sul da célula teste em Lisboa

Quadro 5.9 – Necessidade energética global para a célula teste em Lisboa

Lisboa	Necessidade nominal de aquecimento [kWh/m ² .ano]	Necessidade nominal de arrefecimento [kWh/m ² .ano]	Necessidade energética global [kWh/m ² .ano]
Parede Trombe	6,43	6,98	13,41
Envidraçado	18,23	9,51	27,74
Parede dupla	33,73	3,29	37,02

Analisando o Quadro 5.9 verifica-se que, na solução “Parede Trombe”, a necessidade nominal de arrefecimento é ligeiramente superior à necessidade nominal de aquecimento. Ainda assim, trata-se de um valor baixo de necessidade nominal de arrefecimento e pode-se concluir que a utilização dos sistemas de sombreamento (pala e persianas) para esta solução é eficaz. Verifica-se que a parede Trombe é a melhor solução quando são comparados os valores da necessidade energética global com a solução de envidraçado ou parede dupla ao longo de um ano. Comparando os valores das necessidades de aquecimento e arrefecimento entre a solução de - “Parede Trombe” e “Envidraçado” - conclui-se que o sistema de parede Trombe é a melhor solução conseguindo obter uma poupança energética anual de 51,6%. Verifica-se que o valor da necessidade nominal de aquecimento para a solução de parede dupla é consideravelmente superior às outras duas soluções, justificando-se com a ausência de qualquer sistema de ganho directo ou indirecto orientado a Sul. Na solução de “parede dupla” a necessidade nominal de aquecimento é tão elevada que não compensa com o baixo valor da necessidade nominal de arrefecimento. Comparando os valores das necessidades de aquecimento e arrefecimento entre a solução de - “Parede Trombe” e “Parede dupla” - conclui-se que o sistema de parede Trombe é a melhor solução durante o ano inteiro e consegue-se uma poupança energética de 63,7%.

5.3.1.2.1 Análise das necessidades energéticas com e sem película selectiva

Realizou-se uma simulação para se analisar os resultados das necessidades energéticas com duas soluções de revestimento da superfície exterior da parede Trombe (Figura 5.11 e Quadro 5.11). Foram simuladas duas soluções: - com aplicação da película selectiva; - sem aplicação da película. As características da película selectiva utilizada apresentam-se no Quadro 5.10. Ao fim de alguns anos de utilização, a película selectiva envelhece perdendo as suas capacidades e características iniciais afectando o rendimento da parede Trombe. Deverá ser um aspecto analisado com cuidado e proceder à substituição da película quando se tornar necessário.

Quadro 5.10 – Características da película selectiva utilizada no *EnergyPlus*

Película selectiva	
Espessura (m)	0,0016
Condutibilidade (W/m.K)	392,61
Densidade (Kg/m ³)	8906,26
Calor específico (J/Kg.K)	370,00
Coefficiente de absorção (α)	0,85
Emissividade (%)	0,05

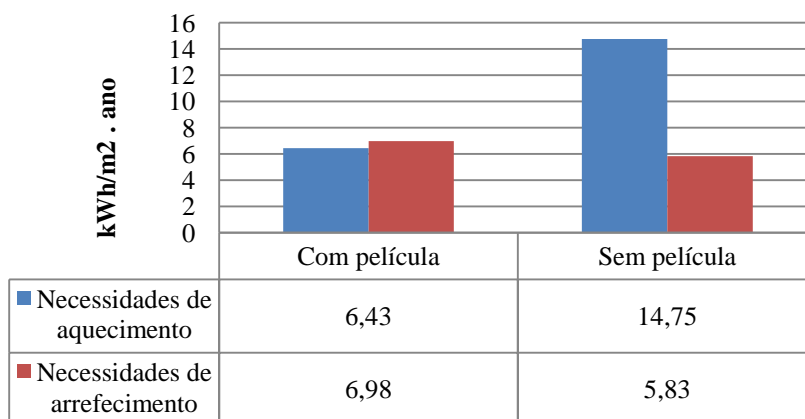


Figura 5.11 - Necessidades de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) por ano com e sem película

Quadro 5.11 – Necessidade energética global para as duas opções

	Necessidade nominal de aquecimento [kWh/m ² .ano]	Necessidade nominal de arrefecimento [kWh/m ² .ano]	Necessidade energética global [kWh/m ² .ano]	Poupança anual [%]
Com película	6,43	6,98	13,41	34,8
Sem película	14,75	5,83	20,58	

Através do Quadro 5.11 conclui-se que, ao final de um ano, consegue-se obter 34,8% de poupança da necessidade energética global com recurso à aplicação da película selectiva comparativamente à solução de não colocar a mesma. Apesar de o valor das necessidades de arrefecimento ser superior na solução “com película”, verifica-se uma diferença significativa no valor das necessidades de aquecimento. Assim, considera-se ser importante a opção pela utilização de uma película selectiva na superfície exterior da parede Trombe para absorver mais energia proveniente da radiação solar e, consequentemente reduzir a necessidade energética global de modo a garantir o nível de conforto no interior dos espaços.

5.3.2 Célula teste localizada em Guimarães

5.3.2.1 Análise da variação da temperatura interior da célula teste

Para a célula teste situada em Guimarães apresentam-se os valores da temperatura exterior e temperatura interior para as três soluções construtivas sem o recurso a equipamentos para obtenção de conforto (Figura 5.12).

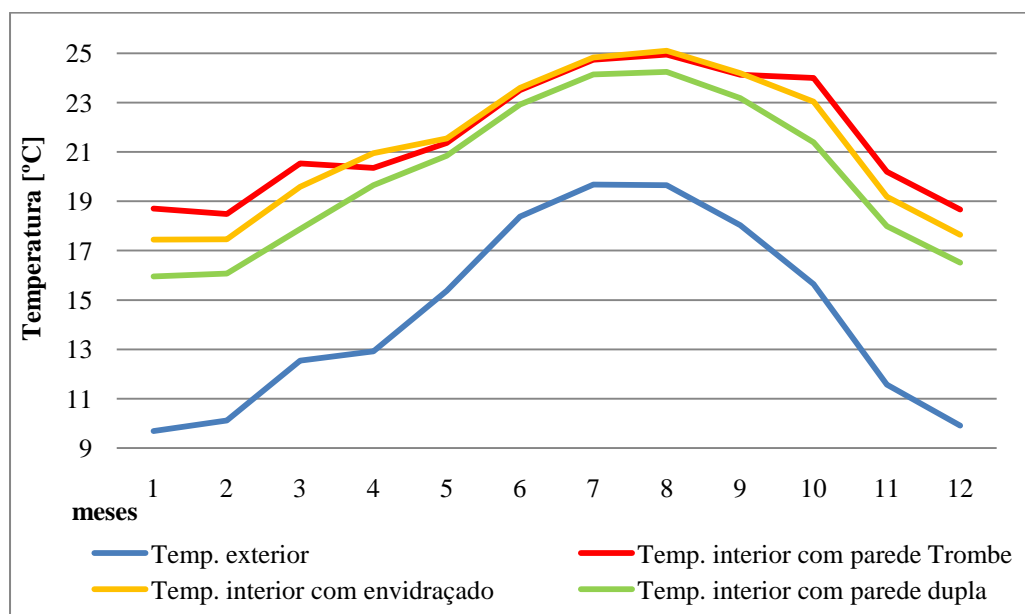


Figura 5.12 – Temperatura média mensal (célula teste em Guimarães)

Analisando o gráfico da Figura 5.12 verifica-se que a temperatura média mensal da solução “parede Trombe” é a que mais se aproxima dos valores de conforto (20°C e 25°C) nos meses pertencentes à estação de aquecimento. No mês de Janeiro verifica-se uma diferença considerável das temperaturas médias mensais entre as três soluções na medida em que a “parede Trombe” é 18,7°C, a solução “envidraçado” 17,4°C e a “parede dupla” é 15,9°C. Na estação de arrefecimento a solução que mais se aproxima dos valores de conforto é a “parede dupla”, no entanto a diferença das temperaturas interiores das três soluções não é tão significativa comparando com os valores da estação de aquecimento.

Para melhor entendimento do comportamento térmico da célula teste no Inverno e Verão separadamente, apresenta-se no gráfico da Figura 5.13 a evolução da temperatura interior ao longo de 24 horas para o dia mais frio da estação de aquecimento (12 de Janeiro) e na Figura 5.14 para o dia mais quente da estação de arrefecimento (9 de Julho).

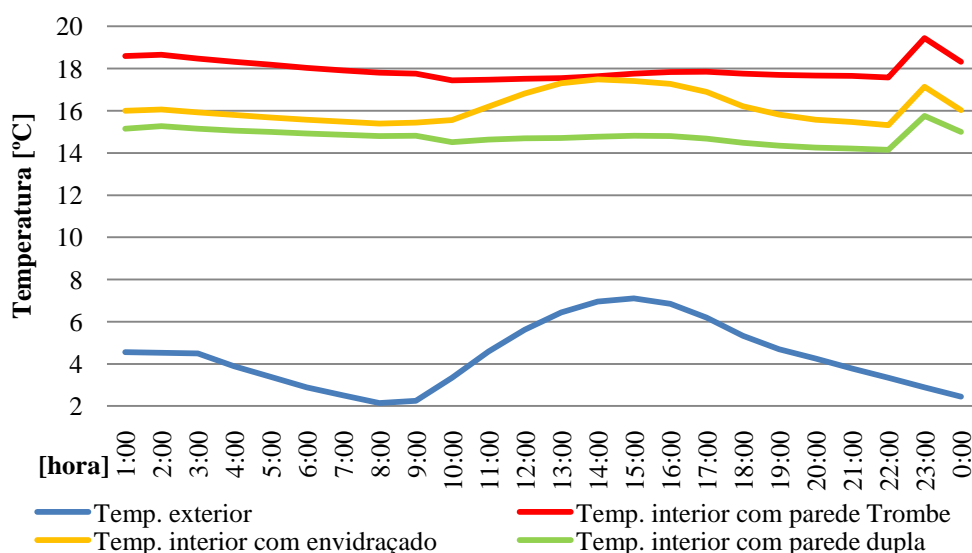


Figura 5.13 - Evolução da temperatura interior no dia 12 de Janeiro

Através do gráfico da Figura 5.13 que a partir das 9h, quando as persianas da solução “envidraçado” são abertas, a temperatura no interior da célula teste começa a subir e iguala a temperatura interior da solução de “parede Trombe” às 14h. Nas horas seguintes, com a diminuição da radiação solar e temperatura exterior, a temperatura interior desce distanciando-se da temperatura da solução “parede Trombe”. Deste modo, verifica-se que a solução de “parede Trombe” mantém a temperatura mais elevada e estável ao longo do dia minimizando a oscilação de temperatura no interior da célula teste. Ao fim do dia, por volta das 23h é visível o contributo que os ganhos internos fornecem para o aumento da temperatura interior através das actividades desenvolvidas pelos ocupantes, funcionamento dos equipamentos e iluminação.

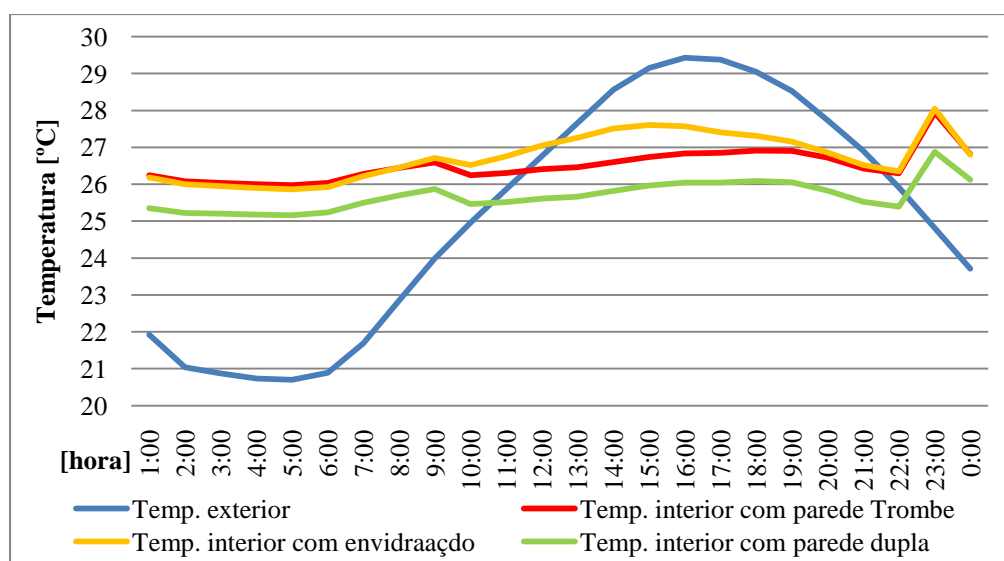


Figura 5.14 - Evolução da temperatura interior no dia 9 de Julho.

Através do gráfico da Figura 5.14 verifica-se que a melhor solução é a “parede dupla”, visto que se consegue obter valores de temperatura interiores mais próximos do desejado (25°C) na estação de arrefecimento. Os valores de temperatura interiores para a solução “envidraçado” são os valores mais elevados nas horas de mais calor e quando a temperatura exterior se encontra mais alta, chega a atingir 27,6°C.

Ao fim do dia, tal como se verificou para a localidade de Lisboa, a partir das 22h, é visível que os ganhos internos se tornam indesejados e fazem aumentar a temperatura interior da célula teste num dia pertencente à estação de arrefecimento quando se pretende obter valores abaixo dos 25°C.

Não são atingidos valores superiores de temperaturas interiores nas horas de maior radiação solar porque o dispositivo de sombreamento (persianas) se encontra encerrado no Verão.

5.3.2.2 Análise das necessidades energéticas da célula teste

Para a célula teste situada em Guimarães, foram calculadas as necessidades de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) para manter a temperatura interior da célula teste entre os 20°C e 25°C, através de um equipamento, durante um ano para as três diferentes soluções construtivas inseridas na parede Sul (Figura 5.15 e Quadro 5.12).

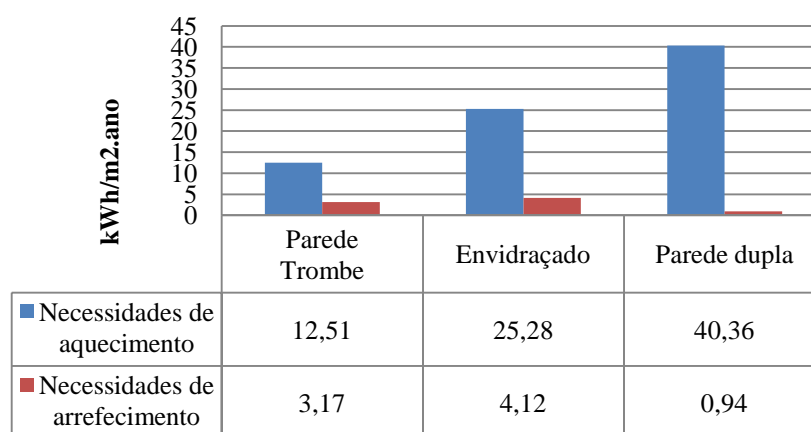


Figura 5.15 – Necessidade nominal de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) para as três soluções construtivas na fachada Sul da célula teste em Guimarães.

As necessidades de aquecimento na cidade de Guimarães são, em todas as soluções simuladas, consideravelmente superiores às registadas na cidade de Lisboa porque se situa numa zona na qual as temperaturas médias exteriores da estação de Inverno são inferiores contribuindo para um maior consumo energético por parte do equipamento para manter o conforto no interior da célula teste.

Quadro 5.12 – Necessidade energética global para Guimarães

Guimarães	Necessidade nominal de aquecimento [kWh/m ² .ano]	Necessidade nominal de arrefecimento [kWh/m ² .ano]	Necessidade energética global [kWh/m ² .ano]
Parede Trombe	12,51	3,17	15,68
Envidraçado	25,28	4,12	29,40
Parede dupla	40,36	0,94	41,30

Analisando os valores das necessidades energéticas globais apresentados no Quadro 5.12 conclui-se que a parede Trombe é a melhor solução visto que se consegue uma poupança energética anual de 46,6% comparativamente com a solução “envidraçado” e 62% com a solução “parede dupla”.

5.3.2.2.1 Análise das necessidades energéticas com e sem película selectiva

Realizou-se uma simulação para se analisar os resultados das necessidades energéticas com duas soluções de revestimento da superfície exterior da parede Trombe (Figura 5.16 e Quadro 5.13). Foram simuladas duas soluções: - com aplicação da película selectiva; - sem aplicação da película. Com esta simulação pretende-se quantificar o contributo, em termos energéticos, da aplicação da película. A película utilizada na simulação em Guimarães é igual à película utilizada para a simulação realizada em Lisboa.

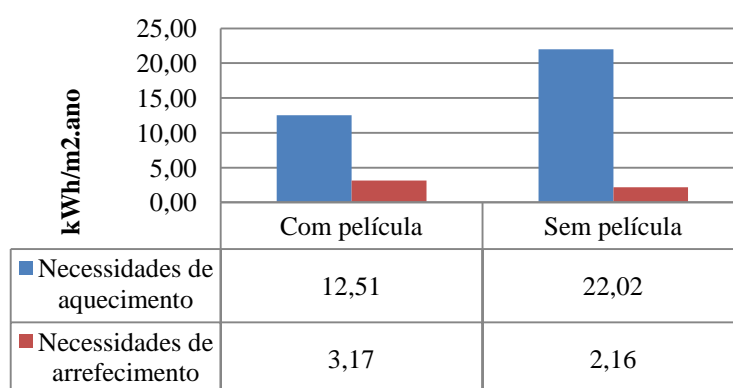


Figura 5.16 – Necessidade nominal de aquecimento (N_{ic}) e arrefecimento (N_{vc}) com e sem película

Quadro 5.13 – Necessidade energética global para as duas opções

	Necessidade nominal aquecimento [kWh/m ² .ano]	Necessidade nominal arrefecimento [kWh/m ² .ano]	Necessidade energética global [kWh/m ² .ano]	Poupança anual [%]
Com película	12,51	3,17	15,68	35,15
Sem película	22,02	2,16	24,18	

Através do Quadro 5.13 conclui-se que, ao final de um ano, consegue-se obter 35,15% de poupança das necessidades energéticas com recurso à aplicação da película selectiva comparativamente à solução de não colocação da mesma. Apesar de o valor da necessidade nominal de arrefecimento ser superior na solução “com película”, verifica-se uma diferença mais significativa no valor da necessidade nominal de aquecimento. Assim, considera-se ser importante a opção pela utilização de uma película selectiva na superfície exterior da parede Trombe para absorver mais energia proveniente da radiação solar e, consequentemente reduzir a necessidade energética global de modo a garantir o nível de conforto no interior dos espaços.

5.4 Poupança económica

As necessidades energéticas estão directamente relacionadas com os custos económicos e de seguida são apresentados os custos económicos anuais para as três soluções construtivas testadas para Lisboa e Guimarães. O preço do kilowatt-hora (kWh) em Portugal é de 0,133€ e foi o valor utilizado para efectuar esta análise ^[25].

5.4.1 Célula teste localizada em Lisboa

Quadro 5.14 – Necessidade energética global e custo anual (Lisboa)

LISBOA	Necessidade energética global [kWh/m ² .ano]	Área da célula teste [m ²]	Necessidade energética global [kWh.ano]	Custo anual [€]
Parede Trombe	13,41	28	375,48	49,93
Envidraçado	27,74	28	776,72	103,30
Parede dupla	37,02	28	1036,56	137,86

Analisando os valores dos custos anuais apresentados no Quadro 5.14 conclui-se que com a adopção da solução “parede Trombe” obtém-se uma poupança anual de 53,37€ e 87,93€ relativamente às soluções “envidraçado” e “parede dupla”, respectivamente.

5.4.2 Célula teste localizada em Guimarães

Quadro 5.15 - Necessidade energética e custo anual (Guimarães)

Guimarães	Necessidade energética global [kWh/m ² .ano]	Área da célula teste [m ²]	Necessidade energética global [kWh.ano]	Custo anual [€]
Parede Trombe	15,68	28	439,04	58,39
Envidraçado	29,39	28	822,92	109,45
Parede dupla	41,30	28	1156,4	153,80

Analisando os valores dos custos anuais apresentados no Quadro 5.15 conclui-se que com a adopção da solução “parede Trombe” obtém-se uma poupança anual de 51,06 € e 95,41€ relativamente às soluções “envidraçado” e “parede dupla”, respectivamente.

5.5 Análise custo benefício das soluções

Dado o interesse que para o processo da selecção do sistema construtivo se reveste o custo económico do investimento inicial e manutenção a longo prazo, considerou-se importante proceder-se à avaliação do custo de cada uma das soluções em estudo.

Neste sentido, calculou-se o custo para a solução da parede Trombe, para a parede dupla com envidraçado e para a parede dupla sem envidraçado. Para a estimativa de custos de construção e manutenção das três soluções construtivas foram consultadas várias empresas, na área da Grande Lisboa e utilizados os preços correntes de mercado aplicáveis. Os valores obtidos tornam evidente que a solução mais cara é a da construção da parede Trombe e a mais barata a parede dupla sem envidraçado. (ver Anexo II)

Ora neste contexto e como já referido neste capítulo importa pois proceder a uma comparação em termos dos princípios da construção sustentável e que se reflecte na análise da solução ao longo do ciclo de vida do edifício.

Deste modo no quadro seguinte equaciona-se o custo inicial, os custos de manutenção dos sistemas e o consumo energético ao longo de um prazo de 20 anos, determinado apenas para efeito de demonstração, dado que o período de vida do edifício é seguramente superior.

- **Célula teste localizada em Lisboa**

Quadro 5.16 – Custo total das soluções ao fim de 20 anos

Lisboa	Construção [Euros]	Manutenção [Euros]	Aumento de consumo energético na vida útil de 20 anos [Euros]	Total [Euros]
Parede Trombe	1159,00	164,00	--	1323,00
Parede dupla com envidraçado	1019,05	187,50	$(103,3-49,93) \times 20 = 1067,4$	2273,95
Parede dupla	270,62	120,00	$(137,86-49,93) \times 20 = 1758,6$	2149,22

Da análise do Quadro 5.16 conclui-se que o período de retorno do investimento na parede Trombe comparativamente à solução de parede dupla é de aproximadamente 11 anos, garantindo deste modo que além de promover o conforto no interior da célula teste também é a melhor solução económica a médio prazo. Relativamente à comparação da parede Trombe com a parede dupla com envidraçado conclui-se que o período de retorno é aproximadamente 4 anos.

- **Célula teste localizada em Guimarães**

Quadro 5.17 – Custo total das soluções ao fim de 20 anos

Guimarães	Construção [Euros]	Manutenção [Euros]	Aumento de consumo energético na vida útil de 20 anos [Euros]	Total [Euros]
Parede Trombe	1159,00	164,00	--	1323,00
Parede dupla com envidraçado	1019,05	187,50	$(109,45-58,39) \times 20 = 1021,2$	2227,75
Parede dupla	270,62	120,00	$(153,85-58,39) \times 20 = 1909,2$	2299,82

Da análise do Quadro 5.17 conclui-se que o período de retorno do investimento na parede Trombe comparativamente à solução de parede dupla é de aproximadamente 11 anos, garantindo deste modo que além de promover o conforto no interior da célula teste também é a melhor solução económica a médio prazo. Relativamente à comparação da parede Trombe com a parede dupla com envidraçado conclui-se que o período de retorno é aproximadamente 4 anos. Assim, conclui-se que a célula teste com a solução de parede Trombe localizada em ambas as cidades é a melhor em termos energéticos e económicos dado que contribui não só para uma poupança de consumo de energia e de manutenção, como torna evidente a valia do seu contributo para a construção sustentável em todos os seus princípios.

5.6 Emissão de gases

Considerou-se importante realizar uma análise das necessidades globais de energia primária (N_{tc}) para garantir os valores de conforto interior na célula teste com as três soluções construtivas ao fim de um ano e consequente emissão de gases CO₂ para a atmosfera.

As emissões de CO₂ equivalente traduzem a quantidade anual estimada de gases de efeito de estufa que podem ser libertados em resultado da conversão de uma quantidade de energia primária igual às respectivas necessidades anuais globais para a célula teste, usando o factor de conversão de 0,0012 toneladas equivalente de CO₂ por kgep.

As necessidades globais anuais nominais específicas de energia primária, N_{tc} , de uma fracção autónoma são calculados com base na seguinte expressão [2]:

$$N_{tc} = 0,1 \left(\frac{N_{ic}}{\eta_i} \right) \cdot F_{pui} + 0,1 \left(\frac{N_{vc}}{\eta_v} \right) \cdot F_{puv} + N_{ac} \cdot F_{pua} \quad (kgep / m^2 \cdot ano) \quad (16)$$

Em que:

F_{pu} – representa o factor de conversão de energia útil para energia primária;

η_i – é a eficiência nominal dos equipamentos para aquecimento;

η_v – é a eficiência nominal dos equipamentos para arrefecimento;

0,1 – redução de 10% baseada em dados estatísticos que apontam para uma utilização dos equipamentos para aquecimento/arrefecimento restrito a um período que corresponde a aproximadamente 10% do total necessário

Os factores de conversão F_{pu} entre energia útil e energia primária adoptados pelo RCCTE são:

- a) $F_{pu} = 0,290$ kgep/kwh no caso de electricidade
- b) $F_{pu} = 0,086$ kgep/kwh no caso dos combustíveis sólidos, líquidos e gasosos.

Para a eficiência nominal dos equipamentos deverão ser utilizados os valores correspondentes aos equipamentos instalados, fornecidos pelos fabricantes na base de ensaios normalizados. Na ausência de informação mais precisa, podem ser adoptados os valores de referência:

Bomba de calor (aquecimento): $\eta = 4$

Bomba de calor (arrefecimento): $\eta = 3$

Para a célula teste localizada em Lisboa obtém-se os seguintes valores de Necessidades globais de energia primária (N_{tc}):

Parede Trombe

$$N_{tc} = 0,1 \left(\frac{6,43}{4} \right) \cdot 0,290 + 0,1 \left(\frac{6,98}{3} \right) \cdot 0,290 = 0,114 (\text{kgep} / \text{m}^2 \cdot \text{ano})$$

Envidraçado

$$N_{tc} = 0,1 \left(\frac{18,23}{4} \right) \cdot 0,290 + 0,1 \left(\frac{9,51}{3} \right) \cdot 0,290 = 0,224 (\text{kgep} / \text{m}^2 \cdot \text{ano})$$

Parede dupla

$$N_{tc} = 0,1 \left(\frac{33,73}{4} \right) \cdot 0,290 + 0,1 \left(\frac{3,29}{3} \right) \cdot 0,290 = 0,276 (\text{kgep} / \text{m}^2 \cdot \text{ano})$$

Na Figura 5.17 e Quadro 5.18 apresentam-se os valores das emissões de gases CO₂ para a célula teste localizada em Lisboa.

Quadro 5.18 - Emissão de gases CO₂ para a célula teste em Lisboa

Lisboa	Necessidades globais de energia primária (N_{tc}) [kgep/m ² .ano]	Área da célula teste [m ²]	Emissão de gases [kg.CO ₂ .ano]
Parede Trombe	0,114	28	3,83
Envidraçado	0,224	28	7,53
Parede dupla	0,276	28	9,27

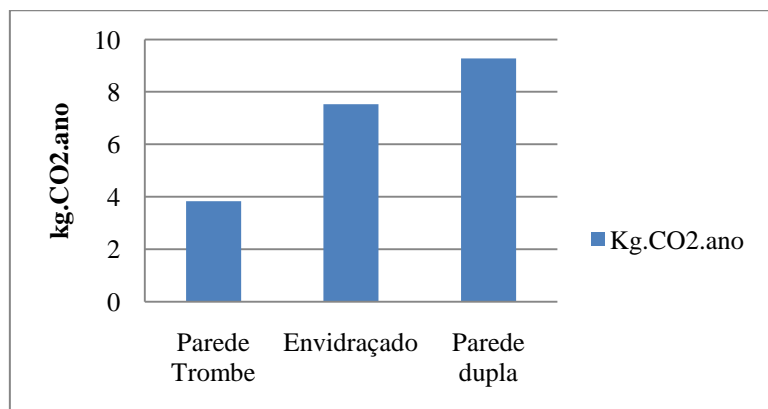


Figura 5.17 - Emissão anual de gases de efeito de estufa associadas à energia primária para climatização (célula teste em Lisboa)

Analisando os valores de emissões de gases presentes no Quadro 5.18 e Figura 5.17 conclui-se que a adopção da solução “Parede Trombe” permite a poupança de emissão de 3,70 kg.CO₂.ano e de 5,44 kg.CO₂.ano relativamente às soluções “envidraçado” e “parede dupla”, respectivamente.

Para a célula teste localizada em Guimarães obtém-se os seguintes valores de Necessidades globais de energia primária (N_{tc}):

Parede Trombe

$$N_{tc} = 0,1 \left(\frac{12,51}{4} \right) \cdot 0,290 + 0,1 \left(\frac{3,71}{3} \right) \cdot 0,290 = 0,127 (kgep / m^2 \cdot ano)$$

Envidraçado

$$N_{tc} = 0,1 \left(\frac{25,28}{4} \right) \cdot 0,290 + 0,1 \left(\frac{4,12}{3} \right) \cdot 0,290 = 0,223 (kgep / m^2 \cdot ano)$$

Parede dupla

$$N_{tc} = 0,1 \left(\frac{40,36}{4} \right) \cdot 0,290 + 0,1 \left(\frac{0,94}{3} \right) \cdot 0,290 = 0,301 (kgep / m^2 \cdot ano)$$

Na Figura 5.18 e Quadro 5.19 apresentam-se os valores das emissões de gases CO₂ para a célula teste localizada em Lisboa.

Quadro 5.19 - Emissão de gases CO₂ para a célula teste em Guimarães

Guimarães	Necessidades globais de energia primária (N _{te}) [kgep/m ² .ano]	Área da célula teste [m ²]	Emissão de gases [kg.CO ₂ .ano]
Parede Trombe	0,127	28	4,27
Envidraçado	0,223	28	7,49
Parede dupla	0,301	28	10,11

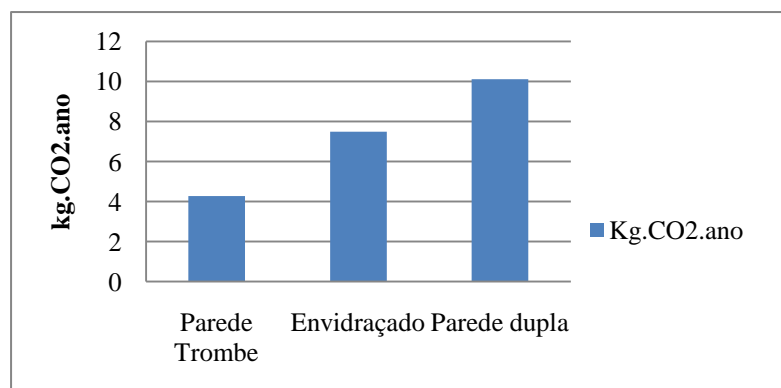


Figura 5.18 - Emissão anual de gases de efeito de estufa associadas à energia primária para climatização (célula teste em Guimarães)

Analisando os valores de emissões de gases presentes no Quadro 5.19 e Figura 5.18 conclui-se que a adopção da solução “Parede Trombe” permite a poupança de emissão de 3,22 kg.CO₂.ano e de 5,84 kg.CO₂.ano relativamente às soluções “envidraçado” e “parede dupla”, respectivamente.

5.7 Discussão de resultados

Na presente dissertação foi efectuada uma análise e enquadramento da Construção Sustentável à necessidade de alterar procedimentos de construções recentes tendo em consideração as vantagens que a solução solar passiva - Parede Trombe - tem no contexto da eficiência energética dos edifícios.

Neste sentido efectuou-se a análise das temperaturas interiores ao longo do ano e durante 24h nos dias mais frio e mais quente da estação de Inverno e Verão sem o controlo de temperatura interior da célula teste para se compreender o comportamento térmico das três soluções construtivas. Na análise dessas mesmas temperaturas, concluiu-se que a solução de “parede Trombe” é a melhor a adoptar porque é a solução que obtém valores de temperatura interiores mais próximos dos valores padrões de conforto (20°C e 25°C) fazendo uma análise

global de um ano. Trata-se, ainda, da solução que menos varia a temperatura interior ao longo do dia contribuindo, deste modo, para a diminuição da oscilação da temperatura interior e consequente conforto.

De seguida procedeu-se o estudo relativo às necessidades energéticas ao longo de um ano que são obtidas através da introdução de um equipamento que controla a temperatura interior da célula teste para se situar sempre entre 20°C e 25°C. Através da simulação para a cidade de Lisboa, concluiu-se que a parede Trombe é a solução em que se obtém menores necessidades energéticas ao longo do ano comparativamente às soluções de “envidraçado” e “parede dupla”, com poupanças energéticas anuais de 51,6% e 63,7%, respectivamente. Através da simulação para a cidade de Guimarães também se concluiu que a melhor solução relativamente às necessidades energéticas anuais é a “parede Trombe” visto que obteve poupanças energéticas anuais de 46,6% e 62% comparativamente com as soluções “envidraçado” e “parede dupla”, respectivamente.

Realizou-se, ainda, uma simulação referente à aplicação ou não de uma película selectiva na superfície exterior da parede Trombe e concluiu-se que se consegue melhorar a eficiência do sistema ao conseguir uma poupança anual de 34,8% para a célula teste em Lisboa e 35,15% em Guimarães ao fim de um ano. Deste modo, ficou demonstrada a importância da aplicação de uma película selectiva na superfície exterior da parede Trombe para o desempenho deste sistema.

Para um maior rigor e objectividade do tratamento do tema considerou-se importante que a discussão da eficiência energética do contributo da questão da investigação inicial pudesse ser reforçada com uma validação económica que se efectuou no capítulo 5.4.

Procedeu-se, por fim, a uma análise de emissão de gases de CO₂ para a atmosfera que está directamente relacionada com as necessidades energéticas obtidas para manter a temperatura interior da célula teste nos padrões de conforto. Conclui-se que a solução de “parede Trombe” em ambas as cidades é a que menos gases de CO₂ emite para a atmosfera e permite poupanças consideráveis comparativamente às outras soluções construtivas.

Deste modo conclui-se que a solução da parede Trombe é a que melhor desempenho tem no conjunto global e por consequente mais se enquadra nos princípios da Construção Sustentável.

6 Conclusões

6.1 Conclusão

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões finais do trabalho, tendo por base o capítulo anterior e as suas conclusões parciais.

A “obrigatoriedade” de baixar o consumo energético mundial, onde se inclui a actividade desenvolvida pelo sector da construção, implica a adopção de medidas que permitam alcançar o objectivo e que em simultâneo protejam o meio ambiente em que o recurso à utilização de energias renováveis é a medida mais visível no presente como caminho a adoptar. A radiação solar proveniente do Sol, fonte de energia renovável, pode e deve ser aproveitada para o aquecimento dos edifícios sem a necessidade de recorrer a sistemas activos que consomem energia.

Através da presente dissertação, foi possível comprovar que o sistema solar passivo – parede Trombe – contribui para uma redução das necessidades energéticas e em simultâneo contribuem para o conforto no interior da habitação.

O *EnergyPlus* é uma ferramenta útil para a fase de projecto de execução devido à possibilidade de se estudar o comportamento térmico do edifício através de uma análise dinâmica, mais próximo da realidade. Com a introdução de variáveis como a presença de pessoas e suas respectivas actividades assim como a definição de horários de funcionamento dos equipamentos e iluminação consegue-se obter valores de consumos energéticos próximos da realidade. A introdução de horários de funcionamento do dispositivo de sombreamento (persianas) é fundamental para o desempenho e eficácia dos sistemas “parede Trombe” e “envidraçado”. Deste modo, contribui para a rápida análise do comportamento energético do edifício e melhoria do nível de conforto térmico obtido por soluções passivas.

O caso de estudo analisado através do programa *EnergyPlus* consistiu na simulação de uma célula teste com 28m² localizada em Lisboa e Guimarães sobre a qual se testaram três soluções construtivas diferentes para uma mesma parede orientada a Sul (uma parede Trombe, uma parede dupla com envidraçado e uma parede dupla). Através dos gráficos elaborados a partir dos dados do programa *EnergyPlus* comprovou-se que, com a implementação de uma parede Trombe é possível consumir menos energia ao longo do ano para garantir uma temperatura entre 20°C e 25°C face às soluções de envidraçado e parede dupla.

A parede Trombe, sendo um sistema solar passivo, necessita de captar o máximo da radiação solar na estação de Inverno e ficou demonstrado através de simulações do programa *EnergyPlus* que a aplicação de uma película selectiva na superfície exterior da mesma é fundamental para a eficácia do sistema e consequente redução de consumo de energia.

A análise custo benefício efectuada permitiu concluir que a solução “parede Trombe” é a que tem um custo inicial mais elevado, no entanto, com a poupança energética e custos de manutenção ao fim de alguns anos passa a ser a solução mais económica comparativamente às outras duas soluções. Em ambas as cidades o investimento na solução “parede Trombe” tem o seu período de retorno de 11 anos comparando com a solução “parede dupla” e 4 anos comparando com a solução “envidraçado”.

A análise de emissão de gases permitiu quantificar a poupança de emissão dos mesmos para a atmosfera através da opção da solução de parede Trombe em detrimento das outras duas soluções.

O caso de estudo incidiu numa célula teste com 28m², o que significa que as poupanças anuais referentes aos custos não são muito significativas, no entanto, numa habitação com mais quartos com parede Trombe integrada ou até mesmo num edifício em altura com vários pisos, obter-se-á expectavelmente poupanças mais significativas ao nível económico, energético e consequente emissão de gases para a atmosfera.

Por fim, os resultados devem ser interpretados com o devido cuidado, tendo em conta os pressupostos utilizados.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

As preocupações com o meio ambiente, a temática da construção sustentável e o aumento do consumo energético mundial são assuntos extensos e não se extinguem com a realização da presente dissertação.

Após a demonstração de que a parede Trombe é uma eficiente solução de sistema solar passivo e tendo em conta que Portugal é um país com elevado potencial para aproveitamento de energia solar mostra-se importante desenvolver o estudo para uma habitação de maior dimensão com mais divisões.

Poderá ainda nesses desenvolvimentos futuros ser realizado um outro estudo para definir a espessura de parede Trombe para outros tipos de clima e um estudo comparativo do rendimento da parede Trombe com outras soluções de parede como por exemplo, pedra ou adobe e que poderia ainda agregar a comparação do rendimento da parede Trombe quando implementada em edifícios situados em países do Norte da Europa, pois são locais onde existem mais dias com céu nublado e pode afectar o rendimento do sistema.

Outro desenvolvimento futuro muito relevante é a realização de um estudo de análise custo/benefício do sistema onde deverão ser detalhados os custos de construção e de manutenção da parede Trombe comparativamente a outros sistemas mas enquadrados ao total do edifício.

7 Bibliografia

- [1] *Actas do II Congresso Ibero-americano de Acústica*, Madrid 2000.
- [2] AELENEI, Daniel - *RCCTE "Light"* – Departamento Engenharia Civil da Faculdade Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [3] AFONSO, João - *Estudo do comportamento térmico de Edifícios Antigos* [dissertação de mestrado]. Faculdade Ciências e Tecnologia, Lisboa; 2009.
- [4] Agência Portuguesa do Ambiente - Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. [acesso em 23.03.2010]. Disponível em: www.apambiente.pt/politicasambiente/Residuos/fluxresiduos/RCD/Paginas/default.asp
- [5] ALLARD, Francis *et al* - *Natural Ventilation in Buildings*, James & James, Ltd, 1998.
- [6] AMADO, Miguel *et al*. - *O Processo da Construção Sustentável. 1º Congresso Lusófono sobre Ambiente e Energia*. Estoril, Setembro 2009.
- [7] AMADO, Miguel. - *Conservação energética em edifícios de habitação e o nível de conforto ambiental, in Construção 21- Congresso Nacional da Construção*, Lisboa, 2001.
- [8] AMADO, Miguel. - *Conservação e manutenção dos edifícios*, Urbanismo & Construção, 1999.
- [9] BARROS, Érica - *Avaliação de Desempenho Ambiental de Edifícios* [dissertação de mestrado]. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.
- [10] BARROSO, Cláudia; SANTOS, Maria, et al- *Bioclimatismo no Projecto de Arquitectura: Dicas de Projecto* [Pós-Graduação em Arquitectura], Faculdade de Arquitectura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2005.
- [11] BRAGANÇA, Luís; MATEUS, Ricardo - *Sustentabilidade de Soluções Construtivas. In: 2º Congresso sobre Construções Sustentáveis*. Porto, 2006.
- [12] BRAGANÇA, Luís - *Princípios de desenho e metodologias de avaliação da sustentabilidade das construções*. Departamento Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2005.

- [13] BRITO, Carla - *Água como recurso renovável. O design na concepção de um produto para uma prática sustentável* [dissertação de mestrado]. Faculdade Engenharia Universidade do Porto; 2008.
- [14] CANHA DA PIEDADE, António - *Ventilação Natural de Edifícios - 1º Curso Física da Construção e Tecnologias Solar-Passivas*. Instituto Superior Técnico, págs. 2-6 ; Novembro de 1999.
- [15] CANHA DA PIEDADE, António; MORET RODRIGUES, António; BRAGA, Ana - *Térmica de Edifícios*, (1ª edição), Edições Orion, Março de 2009.
- [16] CEPINHA, Eloísa; RODRIGUES, Marta. - *Sistemas de avaliação na construção sustentável: aplicação do Green Building Tool*. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2003.
- [17] COFAIGH, J; OLLEY, J. - *The Climatic Dwelling*. Editora James & James, University College Dublin; 1998.
- [18] Construlink - Construir Portugal, Da história à realidade. [acesso em 13.07.2010]. Disponível em:
http://www.construlink.com/Homepage/2010_construirportugal.com/?acao=submenu2&id=34
- [19] COUTO, João; TEIXEIRA, José; COUTO, Armanda - *Desconstrução. Uma ferramenta para Sustentabilidade da Construção*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho; 2006.
- [20] Decreto-Lei N°79/2006 de 4 de Abril - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)
- [21] Decreto-Lei N°80/2006 de 4 de Abril - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)
- [22] DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia. [acesso em 28.04.2010]. Disponível em: www.dgge.pt
- [23] *Eficiência Energética nos edifícios residenciais - Manual do Consumidor, Intelligent Energy Europe*, ADENE. Lisboa, 2008.

- [24] ELLIS, Peter – *Development and validation of the unvented Trombe wall model in EnergyPlus*, Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA, 2003
- [25] Energia de Portugal - EDP, [acesso em 18.10.2010]. Disponível em: www.edp.pt
- [26] *Enginnering Reference, EnergyPlus*, 20 de Abril, 2010.
- [27] ESTEVES, Miguel - *Avaliação do comportamento de paredes de Trombe não ventiladas no contexto da verificação térmica regulamentar* [dissertação de mestrado]. Faculdade Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2009.
- [28] GONÇALVES, Hélder - *Comportamento de sistemas solares passivos em edifícios*, [dissertação de mestrado], Faculdade Engenharia da Universidade do Porto, 1986.
- [29] GONÇALVES, Hélder; GRAÇA, João. - *Conceitos bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. Edição INETI. Lisboa, 2004.
- [30] GONÇALVES, Hélder *et al* - *Edifícios Solares Passivos em Portugal*. INETI-ITE, Lisboa; págs. 2-22; 1997.
- [31] GONÇALVES, Hélder *et al*. - *Física da Construção e Tecnologias Solar Passivas – Térmica de Edifícios*, INETI, 1999.
- [32] GOUVEIA, Pedro - *Caracterização dos Impactes da envolvente no desempenho térmico dos edifícios* [dissertação de mestrado]. Instituto Superior Técnico, Janeiro 2008.
- [33] HENRIQUES, Fernando - *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade Ciências e Tecnologia, 2007.
- [34] *Input Output Reference, The Encyclopedic Reference to Energy Plus Input and Output*, Novembro, 2008.
- [35] International Energy Agency. (IEA). Disponível em: <http://www.iea.org/>
- [36] LAMBERTS, R; DUTRA, L; PEREIRA, F. - *Eficiência energética na Arquitectura*. PW-Editores; págs. 28-50; 1997.

- [37] MATEUS, Ricardo - *Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção*. [dissertação de mestrado]. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2004.
- [38] MENDONÇA, Paulo - *Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados*. [tese de doutoramento]. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2005.
- [39] MAZRIA, Edward - *El libro de la energia solar passiva*. GG Ediciones G.Gili, S.A, México, 1983.
- [40] McFARLAND, R.D.; BALCOMB, J.D. - *A simple empirical method for estimating the performance of passive solar heated building of the thermal storage wall type*, *Proceedings of the Second National Passive Solar Conference*, ISES, USA, 1978.
- [41] MOURÃO, Joana; PEDRO, João - *Sustentabilidade Ambiental da Habitação e áreas residenciais*, Edições LNEC, Lisboa; Fevereiro 2005.
- [42] MOITA, Francisco - *Energia Solar Passiva*, Edições Argumentum, 1985.
- [43] Norma Europeia - *EN ISO 13790 - Energy Performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*, 2007.
- [44] OLGAY, Victor - *Arquitectura y Clima - Manual de diseño bioclimático* (2ª edição), Editorial Gustavo Gili, págs. 17-28; 1998.
- [45] PARDO, Álvaro; DOMINGUEZ, Servando; FERNANDÉZ, Juan - *Revision of the Trombe wall calculation method proposed by UNE-EN ISO 13790*. Escuela Superior de Ingenieros. Universidade de Sevilha, 2010.
- [46] PINHEIRO, Manuel - *Ambiente e Construção Sustentável*. Edição Instituto do Ambiente, Amadora, 2006.
- [47] PINHEIRO, Manuel - *Construção Sustentável – Mito ou Realidade?*, VII Congresso Nacional de Engenharia do Ambiente. Lisboa, Novembro de 2003.
- [48] PINHEIRO, Manuel - *Sistema Voluntário para avaliação da construção sustentável* [acesso em 10.06.2010]. Disponível em: www.lidera.info/.

- [49] Rede de Tecnologia social - Gestão da água é estratégia para o futuro – [acesso em 15.03.2010]. disponível em: http://www.rts.org.br/artigos/artigos_-_2009/gestao-da-agua-e-estrategica-para-o-futuro
- [50] ROCHETA, Vera; FARINHA, Fátima. *Práticas de projecto e construtivas para a construção sustentável, 3º Congresso Construção*. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, 2007.
- [51] RUIVO, João; VEIGA, João - *Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição*. [Trabalho Final de curso]. Instituto Superior Técnico, Lisboa; 2004.
- [52] SANTO, Hugo - *Procedimentos para uma certificação da construção sustentável* [dissertação de mestrado]. Faculdade Ciências e Tecnologia, Lisboa; 2010.
- [53] SANTOS, Carlos; MATIAS, Luís - *Coeficientes de Transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios – ITE 50*. LNEC, Lisboa 2007.
- [54] *Shading Systems - Solar Shading for the European climates*. [acesso em 19.05.2010]. Disponível em: <http://www.es-so.com/documents/EurCommOnSolarShading.pdf>
- [55] SIMÕES, Fausto - *A parede Trombe não ventilada na Casa Solar Passiva de Vale Rosal*. 2010.
- [56] SIMÕES, Fausto - *Vale Rosal Passive Solar House - An Experience in Process. Proceedings of the 6º International PLEA Conference*. Porto.
- [57] SIMÕES, Fausto - *Vale Rosal Passive Solar House - Project and Construction. International Symposium of Passive Solar Technics for Energy Conservation in Buildings*. LNEC, Lisboa, 1986.
- [58] TEIXEIRA, Tiago - *Reabilitação Sustentável de edifícios industriais* [dissertação de mestrado]. Faculdade Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa; 2009.
- [59] TIRONE, Livia - *Construção Sustentável - Soluções Eficientes Hoje, a nossa Riqueza de Amanhã*. (1ª edição), Novembro 2007.
- [60] TORCELLINI, Paul; PLESS, Shanti – *Trombe Walls in Low-energy Buildings: Practical Experiences. World Renewable Energy Congress VIII and Expo - National Renewable Energy Laboratory, Colorado*, Julho 2004.

- [61] TORGAL, F. *Construção Sustentável. O caso dos materiais de construção*. Universidade do Minho, 2007.
- [62] U.S. Department of Energy – Energy Efficiency & Renewable Energy, *EnergyPlus Energy Simulation Software*. [acesso em 4.09.2010]. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [63] VALÉRIO, Jorge - *Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes* [dissertação de mestrado]. Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico; 2007.
- [64] VIEIRA, José. - *Gestão da água em Portugal. Os desafios do Plano Nacional da Água*. Revista Engenharia Civil, (16), págs. 5-12, Janeiro de 2003.
- [65] WRAY, W.O; BALCOMB, J.D. et al – *A semi-empirical method for estimating the performance of direct gain passive solar heated buildings, Proceedings of the 3rd National Passive Solar Conference*, ISES (USA), 1979.
- [66] XAVIER, A; LAMBERTS, R. - *Proposta de zona de conforto térmico obtida a partir de estudos de campo em Florianópolis*. V Encontro nacional de conforto no ambiente construído e II Encontro Latino-Americano de conforto no ambiente construído, Laboratório de eficiência energética em edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento da Engenharia Civil, 1999.

8 Anexos

8.1Anexo I

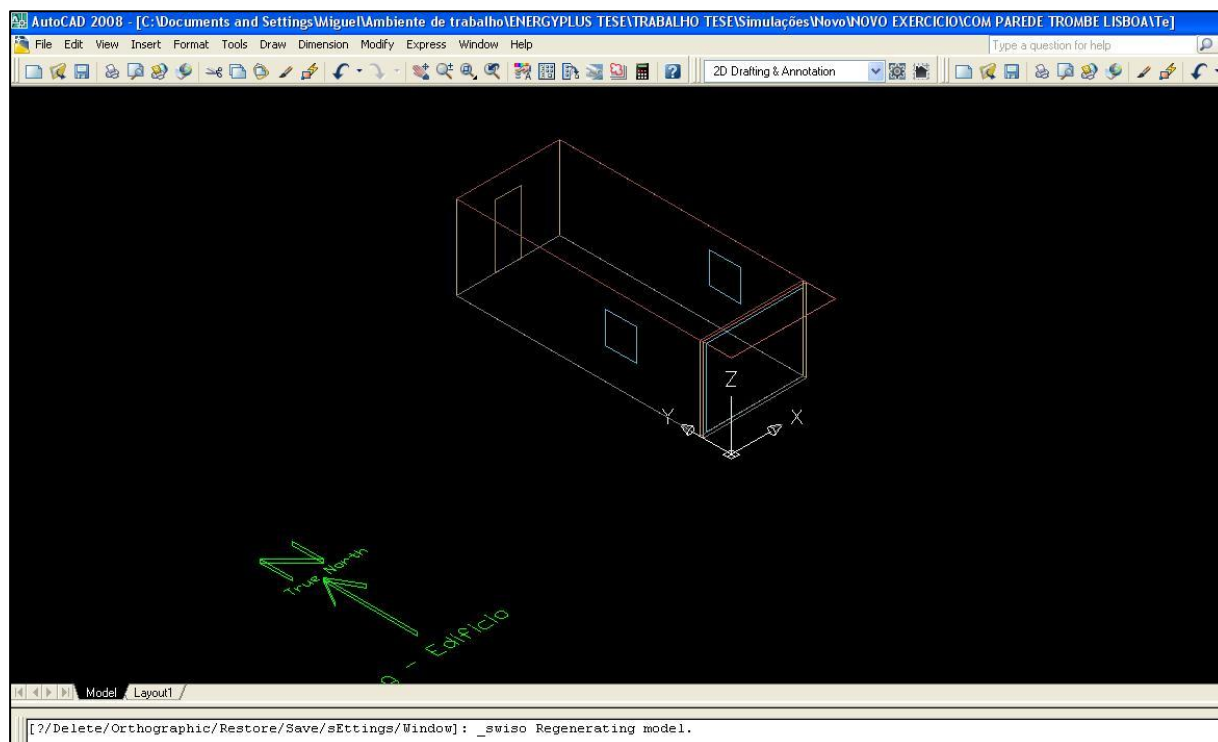


Figura 8.1 – Modelação no *EnergyPlus* da célula teste com parede Trombe

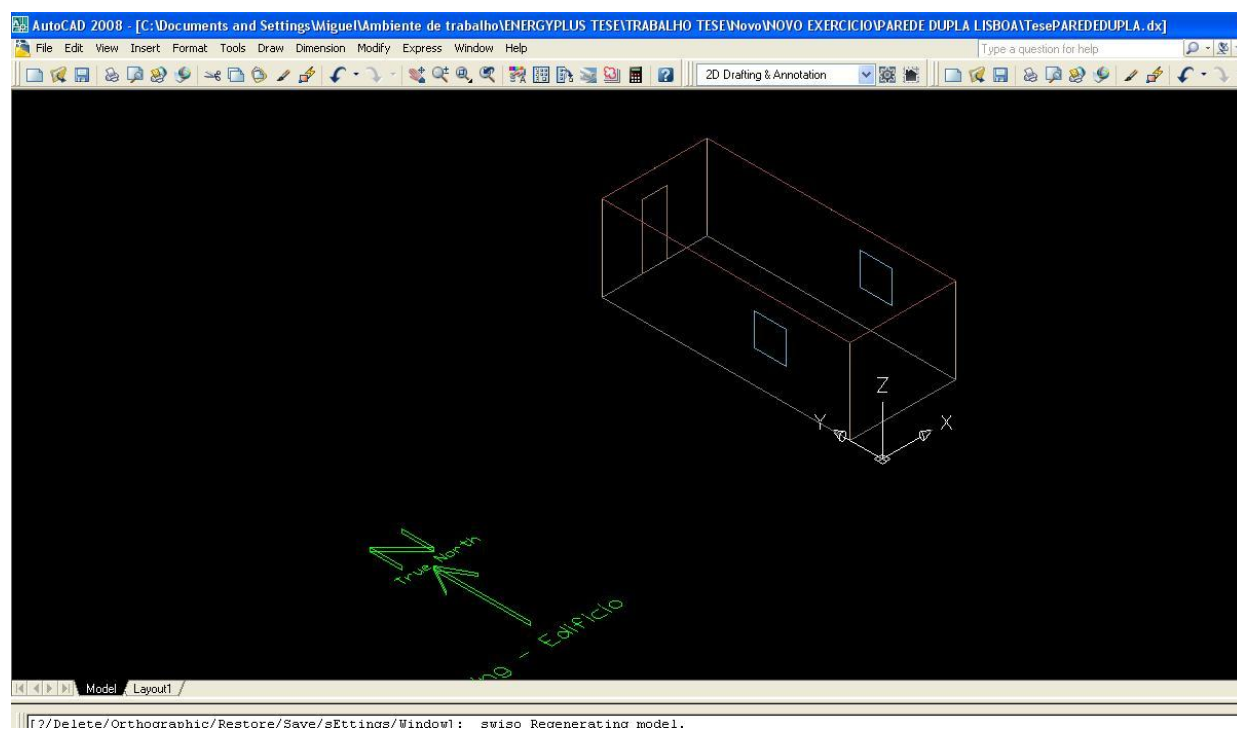


Figura 8.2 – Modelação no *EnergyPlus* da célula teste com parede dupla

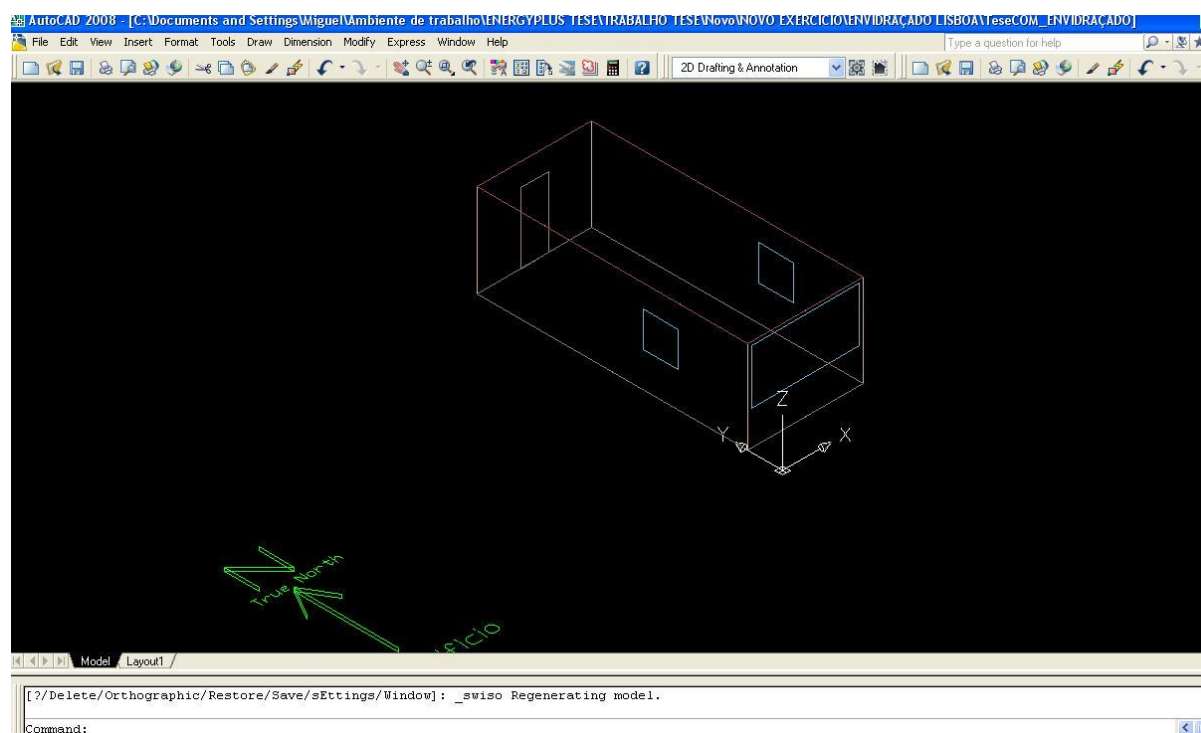


Figura 8.3 - Modelação no *EnergyPlus* da célula teste com “parede dupla e envidraçado”

8.2Anexo II

Custos de Construção

Parede Trombe	Euros/m ³	Euros/m ²	Quantidade	Custo [Euros]	Custo total [€]
Betão	60	--	2,80	--	168,00
Envidraçado simples	--	--	1,00	600,00	600,00
Pintura exterior	--	4,00	8,00	--	32,00
Pintura interior	--	2,50	8,00	--	20,00
Reboco	--	3,00	8,00	--	24,00
Persianas	--	--	1,00	250,00	250,00
Mástiques	--	--	--	15,00	15,00
Mão-de-obra	--	---	--	50,00	50,00
				Total [€]	1159,00

Parede dupla com Envidraçado	Euros/Unidade	Euros/m ²	Quantidade	Custo [Euros]	Custo total [€]
Tijolo	0,15	--	100,00	--	15,00
Isolamento térmico	--	5,50	3,30	--	18,15
Argamassa	--	3,50	6,60	--	23,10
Envidraçado duplo	--	--	1,00	650,00	650,00
Reboco	--	3,00	6,60	--	19,80
Pintura exterior	--	2,50	6,60	--	16,50
Pintura interior	--	2,50	6,60	--	16,50
Persianas	--	--	--	200,00	200,00
Mástiques	--	--	--	15,00	15,00
Mão-de-obra	--	--	--	45,00	45,00
				Total [€]	1019,00

Parede dupla	Euros/Unidade	Euros/m ²	Quantidade	Custo [Euros]	Custo total [€]
Tijolo	0,15	--	240,00	--	36,00
Isolamento térmico	--	5,50	8,00	--	44,00
Argamassa	--	3,50	8,00	--	28,00
Reboco	--	3,00	16,00	--	48,00
Pintura exterior	--	2,50	8,00	--	20,00
Pintura interior	--	2,50	8,00	--	20,00
Mão-de-obra	--	---	--	74,62	74,62
				Total [€]	270,62

Custos de Manutenção

Custos de manutenção das três soluções construtivas adoptadas ^[8].

Parede Trombe	Custo [Euros]
Pintura exterior	64,00
Pintura interior	40,00
Mástiques	60,00
Total [Euros]	164,00

Para a solução de parede Trombe considerou-se:

- Pintura exterior realizada de 10 em 10 anos
- Pintura interior de 10 em 10 anos
- Substituição dos mástiques de 5 em 5 anos

Parede dupla com envidraçado	Custo [Euros]
Pintura exterior	49,50
Pintura interior	33,00
Mástiques	60,00
Rolamentos	45,00
Total [Euros]	187,00

Para a solução de parede dupla com envidraçado considerou-se:

- Pintura exterior realizada de 6 em 6 anos
- Pintura interior de 10 em 10 anos
- Substituição dos mástiques de 5 em 5 anos
- Substituição dos rolamentos ao fim de 15 anos

Parede dupla	Custo [Euros]
Pintura exterior	80,00
Pintura interior	40,00
Total [Euros]	100,00

Para a solução de parede dupla considerou-se:

- Pintura exterior realizada de 6 em 6 anos
- Pintura interior de 10 em 10 anos